MARCOS COELHO MATURANA

Consideração da confiabilidade humana na concepção de sistemas
complexos: desenvolvimento e aplicação da TECHR

São Paulo
2017

MARCOS COELHO MATURANA

Consideração da confiabilidade humana na concepção de sistemas
complexos: desenvolvimento e aplicação da TECHR

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

São Paulo
2017

TERMO DE JULGAMENTO

MARCOS COELHO MATURANA

Consideração da confiabilidade humana na concepção de sistemas
complexos: desenvolvimento e aplicação da TECHR

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Livre-Docente
Marcelo Ramos Martins

Co-Orientador:
Prof. Dr.
Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

São Paulo
2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de março de 2017

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Maturana, Marcos Coelho

Consideração da confiabilidade humana na concepção de sistemas complexos: desenvolvimento e aplicação da TECHR / M. C. Maturana – versão corr. – São Paulo, 2017.
374 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Concepção de Sistemas Complexos 2. Análise Probabilística de Segurança 3. Análise de Confiabilidade Humana 4. Redes bayesianas 5. Technique for Early Consideration of Human Reliability I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.

*À minha esposa e ao meu filho por
todo amor e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins, pela atenção e apoio durante o processo de orientação, e pela contribuição para meu crescimento profissional e intelectual.

Ao Prof. Dr. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, da UFRJ, pelo oferecimento na USP da disciplina “Análise da Contribuição do Fator Humano na Confiabilidade de Sistemas Complexos”, e pela atenção e apoio no desenvolvimento deste projeto.

À Escola Politécnica da USP, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, pela concessão da Licença de Capacitação e pela flexibilidade de horário para a realização de disciplinas e demais atividades do curso.

Às muitas pessoas com quem troquei ideias sobre esta tese ou que, com seu trabalho, viabilizaram sua conclusão, especialmente no CTMSP, no Departamento de Engenharia Naval e no LABRISCO, pelo inestimável apoio e incentivo.

RESUMO

MATURANA, M. C. **Consideração da confiabilidade humana na concepção de sistemas complexos: desenvolvimento e aplicação da TECHR**. 2017. 374 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

A APS (Análise Probabilística de Segurança) de instalações industriais é assunto que evoluiu com a complexidade dos sistemas. A princípio, foram desenvolvidas ferramentas e técnicas com o propósito de analisar plantas já instaladas, possibilitando a identificação de fenômenos e mecanismos de falha desconhecidos até então. Com a evolução dos estudos dos acidentes, foram desenvolvidas técnicas aplicáveis às fases pré-operacionais com o propósito de diminuir os riscos na operação. Observa-se, portanto, um bom número de técnicas ideais para analisar projetos prontos ou em fase de conclusão. O mesmo não é observado para a fase de concepção. Apesar disto, cada vez mais especialistas na área de risco propõem que as considerações de segurança são mais eficazes quando ponderadas ao longo de toda a vida dos sistemas críticos. O estudo das APS realizadas no mundo em várias indústrias ajuda a entender o consenso sobre a contribuição potencial destas análises no desenvolvimento de novos sistemas. Para explorar este potencial, é essencial a elaboração de processos e modelos prospectivos que sejam simples, quantitativos, realistas, capazes de alimentar análises no estágio de projeto e que tragam resultados que possam ser interpretados pelos profissionais envolvidos no processo decisório. Estas considerações são extensíveis à ACH (Análise de Confiabilidade Humana), i.e., poucas são as ferramentas que ponderam aspectos operacionais, em especial o desempenho humano, na fase de projeto. A reconhecida contribuição do fator humano em acidentes envolvendo sistemas complexos – por vezes atribuída à falta de ferramentas adequadas para sua consideração na fase de projeto – evidencia ainda mais esta lacuna.

Neste contexto, esta tese apresenta o desenvolvimento de uma metodologia e de uma técnica para a consideração precoce da confiabilidade humana na concepção de sistemas complexos, sendo que: 1) o desenvolvimento desta metodologia primou pela facilidade de entendimento de suas etapas e resultados, i.e., procurou-se a inteligibilidade para as pessoas envolvidas no projeto, sendo especialistas em ACH ou não, e; 2) a TECHR (*Technique for Early Consideration of Human Reliability*) foi concebida com o propósito de desenvolver um modelo prospectivo para o desempenho humano que possa ser explorado na fase de concepção de sistemas, e se baseia no aproveitamento da opinião de especialistas em relação a sistemas que operam ou operaram nos últimos anos para obter estimativas das probabilidades dos diversos tipos de erro humano que podem ocorrer durante a execução de uma ação específica. A metodologia proposta e a TECHR resultam em um procedimento simples e capaz de produzir modelos extremamente úteis na fase de projeto, representando uma contribuição original para o estado da arte da concepção de sistemas baseada em dados incertos.

Palavras-chave: Concepção de Sistemas Complexos. Análise Probabilística de Segurança. Análise de Confiabilidade Humana. Redes bayesianas. *Technique for Early Consideration of Human Reliability*.

ABSTRACT

MATURANA, M. C. **Consideration of human reliability in complex systems design: development and application of TECHR**. 2017. 374 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PSA (Probabilistic Safety Assessment) is an industrial plant issue that has evolved with the complexity of systems. Initially, tools and techniques have been developed with the main purpose of analyzing operational plants, enabling the identification of phenomena and fault mechanisms hitherto not highlighted. With the evolution of accidents studies, some techniques applicable to pre-operational phases were developed in order to reduce the risks in operation. Therefore, a number of techniques adequate to analyze ready or near completion designs can be found. The same is not observed for the early design phase. Despite this, more and more experts in the risk assessment field suggest that safety considerations are most effective when assessed over the whole life of critical systems. Probabilistic safety analyses performed worldwide in various industries help us understand the consensus on the potential contribution of these analyses for developing new systems. To exploit this potential, it is essential to develop processes and prospective models that are simple, quantitative, realistic, able to feed analyses at the design stage and to bring results that can be interpreted by the professionals involved in the decision making process. These considerations are extended to HRA (Human Reliability Analysis), i.e., there are few tools that consider operational aspects, especially human performance, during the design phase. The recognized contribution of the human factor in accidents involving complex systems – sometimes attributed to the lack of suitable tools for its consideration in the design phase – further highlights this gap.

In this context, this thesis presents a methodology and a technique developed for the early consideration of human reliability in complex systems design, and: 1) the development of this methodology has prioritized the easy understanding of its steps and results, i.e., its intelligibility for people involved in the system design has been sought, with expertise in HRA or not, and; 2) the technique for early consideration of human reliability (TECHR) was designed for developing a prospective human performance model that can be exploited in the system design phase, and is based on the use of expert opinion in relation to systems that operate or have operated in recent years to obtain estimates of the probabilities of the various types of human error that may occur during the performance of a specific action. The proposed methodology and technique result in a simple procedure capable of producing useful models for the design phase, representing an original contribution to the state of the art of systems conception under uncertainty.

Keywords: Complex Systems Design. Probabilistic Safety Assessment. Human Reliability Analysis. Bayesian Networks. Technique for Early Consideration of Human Reliability - TECHR.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ACRÔNIMOS	XIX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	5
1.2 ESTRUTURA DA TESE	7
2 TÓPICOS TEÓRICOS	11
2.1 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA (ACH).....	11
2.2 REDES BAYESIANAS	16
2.2.1 <i>Conceitos básicos</i>	17
2.2.1.1 <i>Probabilidade condicional</i>	20
2.2.1.2 <i>Conjunção de probabilidades</i>	21
2.2.1.3 <i>Representação do domínio</i>	22
2.2.1.4 <i>Complexidade da rede</i>	23
2.2.1.5 <i>Relações de dependência partindo da topologia</i>	24
2.2.2 <i>Inferência</i>	26
2.2.2.1 <i>Inferência exata</i>	27
2.2.2.2 <i>Eliminação de variáveis</i>	30
2.2.2.3 <i>Agrupamento de variáveis</i>	31
2.2.2.4 <i>Inferência aproximada</i>	32
2.2.3 <i>Modelagem por meio de redes bayesianas</i>	33
2.3 COMBINAÇÃO E ATUALIZAÇÃO BAYESIANA DE DADOS	34
2.3.1 <i>Primeiro método</i>	35
2.3.1.1 <i>Exemplo de aplicação do primeiro método</i>	37
2.3.1.2 <i>Rede bayesiana para o exemplo de aplicação do primeiro método</i>	40
2.3.2 <i>Segundo método</i>	45
2.3.2.1 <i>Exemplo de aplicação do segundo método</i>	46
2.3.2.2 <i>Rede bayesiana para o exemplo de aplicação do segundo método</i>	47
2.4 SISTEMAS COMPLEXOS: CONCEITO E CARACTERÍSTICAS	53
2.5 TAXONOMIAS PARA AS AÇÕES E ERROS HUMANOS	55
3 METODOLOGIA PARA A CONCEPÇÃO DE SISTEMAS	57
3.1 ETAPAS DA METODOLOGIA.....	59
3.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	63
3.2.1 <i>Etapa 1 – Cenário</i>	64
3.2.2 <i>Etapas cíclicas</i>	65
3.2.2.1 <i>Etapa 2 – Análise de tarefas</i>	65
3.2.2.2 <i>Etapa 3 – Tecnologia disponível</i>	67

3.2.2.3	<i>Etapa 4 – Funções dos equipamentos</i>	68
3.2.2.4	<i>Etapa 5 – Funções humanas</i>	69
3.2.2.5	<i>Etapas 6, 7 e 8</i>	70
3.2.2.5.1	<i>Etapa 6 – Agrupamento dos agentes</i>	70
3.2.2.5.2	<i>Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade</i>	70
3.2.2.5.3	<i>Etapa 8 – Confiabilidade do sistema</i>	72
3.3	COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO.....	74
4	TECHNIQUE FOR EARLY CONSIDERATION OF HUMAN RELIABILITY (TECHR)	75
4.1	QUANTIFICAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DAS PROBABILIDADES DOS TIPOS DE ERRO HUMANO.....	77
4.1.1	<i>Função de probabilidades para I tipos de erro</i>	80
4.1.2	<i>Função densidade de probabilidades contínua para I tipos de erro</i>	84
4.1.3	<i>Função densidade de probabilidades para I tipos de erro e incerteza na HEP</i>	85
4.1.4	<i>Variabilidade para a probabilidade de um tipo de erro e sua atualização</i>	87
4.2	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	89
4.2.1	<i>Atualização</i>	96
4.2.2	<i>Rede bayesiana para o exemplo</i>	97
4.3	COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO.....	101
5	APLICAÇÃO DA TECHR: BANCO DE PROBABILIDADES DOS TIPOS DE ERRO HUMANO 103	
5.1	SELEÇÃO DE DADOS.....	103
5.1.1	<i>Critérios de seleção</i>	104
5.1.2	<i>Fontes selecionadas</i>	105
5.1.3	<i>Dados utilizados</i>	106
5.1.3.1	<i>CREAM</i>	106
5.1.3.2	<i>HEART</i>	108
5.1.3.3	<i>INTENT</i>	109
5.1.3.4	<i>TESEO</i>	110
5.1.3.5	<i>THERP</i>	112
5.2	DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	114
5.2.1	<i>Tipos de erro humano</i>	114
5.2.2	<i>Associações dos tipos de erro às ações selecionadas</i>	119
5.2.3	<i>Funções de probabilidades dos tipos de erro humano</i>	124
5.2.3.1	<i>Função de probabilidades para os erros associados a uma ação</i>	126
5.2.3.2	<i>Densidade de probabilidades de um tipo de erro associado a uma fonte</i>	128
5.2.3.3	<i>Variabilidade da probabilidade para um tipo de erro</i>	129
5.2.3.4	<i>Variabilidade da probabilidade para os erros listados na Tab. 41</i>	131
5.2.4	<i>Análises do modelo</i>	133
5.3	COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO.....	137
6	APLICAÇÃO DA TECHR: MODELO PROSPECTIVO DE DESEMPENHO HUMANO	139
6.1	COMBINAÇÃO DE DADOS.....	139
6.1.1	<i>Desvios na recuperação da distribuição para a HEP de uma ação</i>	144

6.2	AÇÕES HUMANAS: TAXONOMIA DE BLOOM	148
6.2.1	Domínio cognitivo	149
6.2.2	Domínio afetivo	150
6.2.3	Domínio psicomotor	153
6.2.3.1	Taxonomia de Dave	153
6.2.3.2	Taxonomia de Harrow	153
6.2.3.3	Taxonomia de Simpson	155
6.2.3.4	Comparação entre as taxonomias propostas	156
6.3	MODELO PROSPECTIVO DE DESEMPENHO HUMANO	156
6.3.1	Associação dos tipos de erro humano às ações humanas genéricas	157
6.3.1.1	Domínio Afetivo	157
6.3.1.2	Domínio Cognitivo	158
6.3.1.3	Domínio Psicomotor	160
6.3.2	Quantificação das HEP das ações humanas genéricas	160
6.3.3	Emprego do modelo	164
6.4	COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO	170
7	CONCEPÇÃO DA OPERAÇÃO DO SRPEC	173
7.1	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	173
7.1.1	Etapa 1 – Cenário	173
7.1.1.1	Descrição do sistema	174
7.1.1.2	Restrições para o projeto	178
7.1.1.3	Dados de confiabilidade	179
7.1.1.4	Meta de confiabilidade	181
7.1.2	Etapas cíclicas – 1º iteração	191
7.1.2.1	Etapa 2 – Análise de tarefas	191
7.1.2.2	Etapa 3 – Tecnologia disponível	198
7.1.2.3	Etapa 4 – Funções dos equipamentos	198
7.1.2.4	Etapa 5 – Funções humanas	198
7.1.2.5	Desenvolvimento de soluções – ciclo 1	199
7.1.2.5.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 1)	199
7.1.2.5.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 1)	201
7.1.2.5.3	Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 1)	201
7.1.2.6	Desenvolvimento de soluções – ciclo 2	206
7.1.2.6.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 2)	206
7.1.2.6.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 2)	207
7.1.2.6.3	Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 2)	207
7.1.3	Etapas cíclicas – 2º iteração	210
7.1.3.1	Etapa 2 – Análise de tarefas	210
7.1.3.2	Etapa 3, 4 e 5	212
7.1.3.3	Desenvolvimento de soluções – ciclo 1	212
7.1.3.3.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 1)	212
7.1.3.3.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 1)	214

7.1.3.3.3	Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 1)	214
7.1.3.4	<i>Desenvolvimento de soluções – ciclo 2</i>	215
7.1.3.4.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 2)	215
7.1.3.4.2	Etapa 7 – Seleção da maior Confiabilidade (ciclo 2)	217
7.1.3.4.3	Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 2)	217
7.1.4	<i>Etapa 9 – Descrição da solução para o sistema</i>	220
7.2	COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO	223
8	CONCEPÇÃO DO SRPEC COMPLETO	227
8.1	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	227
8.1.1	<i>Etapa 1 – Cenário</i>	227
8.1.1.1	<i>Características desejadas do sistema</i>	228
8.1.1.2	<i>Restrições para o projeto</i>	230
8.1.2	<i>Etapas cíclicas – iteração única</i>	231
8.1.2.1	<i>Etapa 2 – Análise de tarefas</i>	231
8.1.2.2	<i>Etapa 3 – Tecnologia disponível</i>	233
8.1.2.3	<i>Etapa 4 – Funções dos equipamentos</i>	235
8.1.2.4	<i>Etapa 5 – Funções humanas</i>	235
8.1.2.5	<i>Desenvolvimento de soluções – ciclo 1</i>	237
8.1.2.5.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 1)	237
8.1.2.5.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade – e Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 1)	240
8.1.2.6	<i>Desenvolvimento de soluções – ciclo 2</i>	244
8.1.2.6.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 2)	244
8.1.2.6.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade – e Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 2)	245
8.1.2.7	<i>Desenvolvimento de soluções – ciclo 3</i>	248
8.1.2.7.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 3)	248
8.1.2.7.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade – e Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 3)	251
8.1.2.8	<i>Desenvolvimento de soluções – ciclo 4</i>	256
8.1.2.8.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 4)	256
8.1.2.8.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 4)	256
8.1.2.8.3	Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 4)	256
8.1.2.9	<i>Desenvolvimento de soluções – ciclo 5</i>	257
8.1.2.9.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 5)	257
8.1.2.9.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 5)	261
8.1.2.9.3	Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 5)	261
8.1.2.10	<i>Desenvolvimento de soluções – ciclo 6</i>	266
8.1.2.10.1	Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 6)	266
8.1.2.10.2	Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 6)	266
8.1.2.10.3	Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 6)	267
8.1.3	<i>Etapa 9 – Descrição da solução para o sistema</i>	269
8.2	COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO	272
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	275
	REFERÊNCIAS	279

APÊNDICE A – TABELAS DE PROBABILIDADES PARA A RB NA FIG. 27	299
APÊNDICE B – TABELAS PARA O CAPÍTULO 5.....	301
APÊNDICE C – VARIABILIDADE PARA OS ERROS DA TAB. 41.....	310
APÊNDICE D – VARIABILIDADE DA HEP PARA AS AÇÕES DA TAB. 64	313
APÊNDICE E – ALINHAMENTO DO SRPEC EM CADA MODO OPERACIONAL.....	315
APÊNDICE F – PROBABILIDADES PARA AS RB DOS EVENTOS #E2 E #E4.....	316
APÊNDICE G – PROBABILIDADES PARA A AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE.....	325
APÊNDICE H – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 58	328
APÊNDICE I – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 61	335
APÊNDICE J – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 62.....	342
APÊNDICE K – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 63	344
APÊNDICE L – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 64.....	345
APÊNDICE M – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 65.....	348

LISTA DE FIGURAS

<i>Fig. 1 – Número de técnicas para ACH até 2005 (HOLLNAGEL, 2005).....</i>	<i>13</i>
<i>Fig. 2 – Exemplos de grafos direcionados</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 3 – Rede bayesiana típica demonstrando a topologia e as TPC</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 4 – Estrutura da rede exemplo</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 5 – Dependência do nó A, dados os nós pais</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 6 – Cobertor de Markov para o nó A</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 7 – Nós A e B: d-separados</i>	<i>26</i>
<i>Fig. 8 – Objetivos das inferências</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 9 – Visualização do cálculo</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 10 – Agrupamento de variáveis.....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 11 – Exemplo de rede dinâmica</i>	<i>34</i>
<i>Fig. 12 – Curvas para as Subpopulações 1 e 2.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 13 – Rede bayesiana para o exemplo do primeiro método.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 14 – RB da Fig. 13 atualizada</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 15 – Curvas para a variabilidade populacional e subpopulações</i>	<i>45</i>
<i>Fig. 16 – Rede bayesiana para o exemplo do segundo método.....</i>	<i>51</i>
<i>Fig. 17 – Rede bayesiana da Fig. 16 atualizada</i>	<i>52</i>
<i>Fig. 18 – Consideração da confiabilidade em cada fase do projeto.....</i>	<i>58</i>
<i>Fig. 19 – Consideração da confiabilidade em cada fase do projeto na metodologia.....</i>	<i>59</i>
<i>Fig. 20 – Etapas da metodologia (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015)...</i>	<i>60</i>
<i>Fig. 21 – Passos da HTA associados às fases da metodologia</i>	<i>66</i>
<i>Fig. 22 – 1ª sequência de atividades.....</i>	<i>67</i>
<i>Fig. 23 – RB para a atividade 1. Identificar a temperatura do tanque</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 24 – RB para a atividade 2. Comparar com a temperatura de interesse</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 25 – Variabilidade para as probabilidades dos tipos de erro α, β e γ.....</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 26 – $\phi(p_i)$ e $\phi(p_i E)$ no mesmo plano cartesiano</i>	<i>97</i>
<i>Fig. 27 – RB para o exemplo de aplicação.....</i>	<i>99</i>
<i>Fig. 28 – RB atualizada para o exemplo de aplicação.....</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 29 – Auxílio à identificação do nível de desempenho e de possíveis tipos de erro.....</i>	<i>120</i>
<i>Fig. 30 – Processo de quantificação das variabilidades dos tipos de erro.....</i>	<i>125</i>
<i>Fig. 31 – RB para a função de probabilidades dos tipos de erro para a ação C_E1.....</i>	<i>127</i>
<i>Fig. 32 – RB para a variabilidade da probabilidade do erro EG_1a.....</i>	<i>131</i>
<i>Fig. 33 – Função de probabilidades para os erros associados a C_E1</i>	<i>135</i>
<i>Fig. 34 – Função de probabilidades para o erro EG_1a na CREAM</i>	<i>135</i>

Fig. 35 – Funções de probabilidades para P_α , P_β e P_γ	142
Fig. 36 – Função de probabilidades para a HEP da ação B.....	142
Fig. 37 – Funções de probabilidades para P_α , P_β e P_γ (escala logarítmica).....	143
Fig. 38 – Função de probabilidades para a HEP da ação B (escala logarítmica).....	144
Fig. 39 – Função de probabilidades para a HEP da ação C.....	145
Fig. 40 – Função de probabilidades para a HEP da ação D.....	145
Fig. 41 – Função de probabilidades para a HEP da ação E.....	146
Fig. 42 – Funções de probabilidades para a HEP na ação A_P_1.....	162
Fig. 43 – Esquema do modelo prospectivo atualizável de desempenho humano.....	166
Fig. 44 – RB atualizada para a variabilidade da probabilidade do erro EG_1a.....	169
Fig. 45 – Esquema para o SRPEC.....	174
Fig. 46 – Árvore de eventos para o SRPEC.....	181
Fig. 47 – Rede bayesiana para o evento #E2.....	188
Fig. 48 – Sequência inicial de atividades no procedimento operacional do SRPEC.....	197
Fig. 49 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (ciclo 1).....	202
Fig. 50 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (ciclo 2).....	208
Fig. 51 – Sequência de atividades no procedimento operacional (2º iteração).....	213
Fig. 52 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (2º iteração: ciclo 1).....	216
Fig. 53 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (2º iteração: ciclo 2).....	218
Fig. 54 – Variabilidade para a $P(\text{falha do SRPEC})$, condição “a”.....	222
Fig. 55 – Variabilidade para a $P(\text{falha do SRPEC})$, condição “b”.....	222
Fig. 56 – Sequência inicial de atividades do SRPEC.....	234
Fig. 57 – Esquema para o SRPEC (ciclo 1).....	239
Fig. 58 – RB para o SRPEC (ciclo 1).....	241
Fig. 59 – RB da Fig. 58 com a evidência de falha no SRPEC.....	243
Fig. 60 – Esquema para o SRPEC (ciclo 2).....	245
Fig. 61 – RB para o SRPEC (ciclo 2).....	247
Fig. 62 – RB para o SRPEC (ciclo 3).....	255
Fig. 63 – RB para o SRPEC (ciclo 4).....	258
Fig. 64 – RB para o SRPEC (ciclo 5).....	263
Fig. 65 – RB para o SRPEC (ciclo 6).....	268
Fig. 66 – Variabilidade para a $P(\text{falha no resfriamento})$, condição “a”.....	271
Fig. 67 – Variabilidade para a $P(\text{falha no resfriamento})$, condição “b”.....	271
Fig. 68 – Rede bayesiana para o evento #E2 (adaptada).....	322
Fig. 69 – Rede bayesiana para o evento #E4 (adaptada).....	323

LISTA DE TABELAS

Tab. 1 – Passos da APS e da ACH [adaptada de Martins e Maturana (2010)].....	12
Tab. 2 – Conjunção de probabilidades das variáveis A e B.....	21
Tab. 3 – Cálculo de $P(j,m)$	29
Tab. 4 – TPC para o nó “Parametro”.....	40
Tab. 5 – TPC para o nó “Populacao”.....	41
Tab. 6 – TPC para o nó “Evidencia”.....	42
Tab. 7 – TPC para os nós “Subpopulação 1” e “Subpopulação 2”	48
Tab. 8 – TPC para o nó “Evidência”.....	48
Tab. 9 – TPC para o nó “Peso”.....	50
Tab. 10 – Estados para o nó “População”.....	50
Tab. 11 – TPC para o nó “População” (primeiras entradas).....	51
Tab. 12 – Características do tanque	64
Tab. 13 – Objetivos do sistema e ações humanas associadas	66
Tab. 14 – Equipamentos para o 1ª ciclo.....	68
Tab. 15 – Funções e confiabilidade dos equipamentos para o 1ª ciclo	69
Tab. 16 – Lista de funções humanas	70
Tab. 17 – Associação de agentes às atividades requeridas do sistema.....	70
Tab. 18 – TPC para o nó “1. Identificar a temperatura do tanque” (parcial).....	72
Tab. 19 – $P(\text{Fracasso/Agente})$	72
Tab. 20 – Possíveis combinações.....	79
Tab. 21 – Obtenção de p_α	79
Tab. 22 – Número de possíveis combinações.....	81
Tab. 23 – Ações com HEP estimadas na THERP (SWAIN; GUTTMANN, 1983)	90
Tab. 24 – Tipos de erro para o desempenho no nível de regra (REASON, 1990).....	91
Tab. 25 – Tipos de erro associados às ações da Tab. 23.....	92
Tab. 26 – Funções de probabilidades para as ações da Tab. 23.....	92
Tab. 27 – $P(p_{iq} m,l=5)$ para os erros da ação 20-10(4) em %.....	93
Tab. 28 – $P(p_{iq} m,l=5)$ para os erros da ação 20-11(3) em %.....	93
Tab. 29 – $P(p_{iq} m,l=2)$ para os erros da ação 20-12(5) em %.....	94
Tab. 30 – $P(p_i)$ para os tipos de erros nas ações da Tab. 23.....	94
Tab. 31 – $P(\varphi)$	95
Tab. 32 – $\phi(p_i)$ para o tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais”	95
Tab. 33 – $\phi(p_i E)$ para o erro “sinais contrários e ausência de sinais”.....	96
Tab. 34 – $P(\varphi E)$	97

Tab. 35 – Seleção das fontes de dados	105
Tab. 36 – HEP na CREAM (CHANDLER et al., 2006; HOLLNAGEL, 1998)	107
Tab. 37 – HEP nominal e limites de incerteza na HEART (WILLIAMS, 1985).....	109
Tab. 38 – HEP e limites de incerteza no INTENT [adaptada de Gertman et al. (1992)]	110
Tab. 39 – Parâmetros para a HEP na TESEO [adaptada de Madonna et al. (2009)]	111
Tab. 40 – HEP nominal e EF na THERP.....	113
Tab. 41 – Taxonomia de Reason (1990).....	118
Tab. 42 – Cruzamento entre ações no nível de regra e os erros de Reason.....	120
Tab. 44 – Cruzamento entre ações no nível de conhecimento e os erros de Reason.....	122
Tab. 45 – TPC para o nó “HEP na Ação” da RB da Fig. 31	126
Tab. 46 – TPC para o nó “P(Tipo de erro associado a C_E1)” da RB da Fig. 31	128
Tab. 47 – Funções de probabilidades dos tipos de erro associados à ação C_E1.....	129
Tab. 48 – Função densidade de probabilidades do erro EG_1a em cada fonte	130
Tab. 49 – Variabilidade para a probabilidade do tipo de erro EG_1a	132
Tab. 50 – Variabilidade para os tipos de erro apresentados na Tab. 41	133
Tab. 51 – Δ_{h1} e Δ_{h2} , de acordo com o intervalo de hep'	144
Tab. 52 – Parâmetros para as distribuições das HEP das ações hipotéticas	145
Tab. 53 – Comparação entre as distribuições recuperadas e originais	147
Tab. 54 – Categorias da dimensão “processo cognitivo” e ações humanas associadas	151
Tab. 55 – Categorias do domínio afetivo e ações humanas associadas	152
Tab. 56 – Categorias do domínio psicomotor – Taxonomia de Dave	154
Tab. 57 – Categorias do domínio psicomotor – Taxonomia de Harrow	154
Tab. 58 – Categorias do domínio psicomotor – Taxonomia de Simpson.....	155
Tab. 59 – Associação dos tipos de erro às ações no domínio afetivo	158
Tab. 60 – Associação dos tipos de erro às ações no domínio cognitivo.....	159
Tab. 61 – Associação dos tipos de erro às ações no domínio psicomotor	160
Tab. 62 – Variabilidade para os erros EG_1c e EG_1f.....	161
Tab. 63 – Função de probabilidades para a HEP na ação A_P_1	161
Tab. 64 – HEP para as ações apresentadas na subseção 6.1.....	163
Tab. 65 – Atualização das HEP para as ações apresentadas na subseção 6.1	168
Tab. 66 – Modos operacionais do SRPEC.....	179
Tab. 67 – Funções dos equipamentos e dados de falha para o SRPEC.....	180
Tab. 68 – Obtenção da probabilidade de falha no evento #E1.....	185
Tab. 69 – Obtenção da probabilidade de falha no evento #E3, partindo do modo “C”.....	186
Tab. 70 – Probabilidade de falha no evento #E3 (do modo normal para o degradado).....	187
Tab. 71 – Eventos relacionados às falhas dos equipamentos.....	191
Tab. 72 – Objetivos da tarefa de detecção no evento #D1 e atividades humanas	193

Tab. 73 – Objetivos da tarefa de detecção de falha recuperável no evento #D2.....	194
Tab. 74 – Objetivos da tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A1.....	195
Tab. 75 – Objetivos da tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A2.....	195
Tab. 76 – Objetivos da monitoração e acionamento relacionados ao evento #M1.....	196
Tab. 77 – Objetivos da monitoração e acionamento relacionados ao evento #M2.....	196
Tab. 78 – Correlação com as ações do modelo prospectivo de desempenho humano.....	200
Tab. 79 – HEP para as ações apresentadas na Tab. 78.....	201
Tab. 80 – Probabilidade de “Fracasso”/“Inadequado” para os nós da RB da Fig. 49.....	205
Tab. 81 – Correlação com as ações do modelo prospectivo de desempenho humano.....	207
Tab. 82 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Inadequado” para a RB da Fig. 50.....	209
Tab. 83 – Objetivos da tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A1 (2º iteração).....	211
Tab. 84 – Objetivos da monitoração e acionamento no evento #M1 (2º iteração).....	211
Tab. 85 – Correlação com a ação do modelo de desempenho.....	213
Tab. 86 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Inadequado” para a RB da Fig. 52.....	215
Tab. 87 – Correlação com as ações do modelo prospectivo de desempenho humano.....	216
Tab. 88 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Inadequado” para a RB da Fig. 53.....	219
Tab. 89 – Modos operacionais preliminares para o SRPEC.....	229
Tab. 90 – Objetivos do sistema e ações humanas associadas.....	232
Tab. 91 – Funções e confiabilidade dos equipamentos para a 1ª iteração.....	236
Tab. 92 – Possíveis agentes para a atividade 14.....	238
Tab. 93 – Probabilidade de “Falha” ou “Obstrução” para os equipamentos na Fig. 58.....	244
Tab. 94 – Possíveis agentes para as atividades 5, 8, 9 e 10 (ciclo 3).....	249
Tab. 95 – Possíveis agentes para a atividade 11 (ciclo 3).....	250
Tab. 96 – Possíveis ações humanas no ciclo 3: ações do modelo prospectivo.....	250
Tab. 97 – Possíveis ações humanas no ciclo 4: ações do modelo prospectivo.....	256
Tab. 98 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 2.....	259
Tab. 99 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 3.....	259
Tab. 100 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 4.....	259
Tab. 101 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 15.....	260
Tab. 102 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 16.....	260
Tab. 103 – HEP para as ações apresentadas no ciclo 5.....	260
Tab. 104 – Probabilidade de falha entre a última revisão e os testes pré-operacionais.....	264
Tab. 105 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Falha_resfriamento” na RB da Fig. 64.....	265
Tab. 106 – Correlações entre as ações do modelo e as ações do ciclo 6.....	266
Tab. 107 – HEP para as ações apresentadas no ciclo 6.....	266
Tab. 108 – Modos operacionais para o SRPEC.....	269
Tab. 109 – Atribuição das ações humanas no SRPEC a dois operadores.....	270

Tab. 110 – Atribuição das ações humanas no SRPEC a dois operadores.....	274
Tab. 111 – TPC para o nó “Sinais contrários e ausência de sinais” da RB da Fig. 27.....	299
Tab. 112 – TPC para o nó “Erros Observados” da RB da Fig. 27	300
Tab. 113 – Variabilidade para os erros em ações no nível de habilidade.....	310
Tab. 114 – Variabilidade para os tipos de erro em ações no nível de regra.....	311
Tab. 115 – Variabilidade para os tipos de erro em ações no nível de conhecimento	312
Tab. 116 – Curvas de probabilidade para as HEP das ações no nível de habilidade.....	313
Tab. 117 – Curvas de probabilidade para as HEP das ações no nível de regra.....	313
Tab. 118 – Curvas de probabilidade para as HEP das ações no nível de conhecimento ...	314
Tab. 119 – Alinhamento dos equipamentos do SRPEC em cada modo operacional	315
Tab. 120 – Probabilidades para os nós raízes da RB para o evento #E2.....	316
Tab. 121 – TPC para o nó “Linhas” da RB para o evento #E2	316
Tab. 122 – TPC para o nó “Sinal 2-1” da RB para o evento #E2.....	317
Tab. 123 – TPC para o nó “Trocador de Calor” da RB para o evento #E2	317
Tab. 124 – TPC para o nó “Sinal 2-2” da RB para o evento #E2.....	317
Tab. 125 – TPC para o nó “Válvulas” da RB para o evento #E2	317
Tab. 126 – TPC para o nó “Bombeamento 2” da RB para o evento #E2.....	318
Tab. 127 – TPC para o nó “Bombeamento 1” da RB para o evento #E2.....	319
Tab. 128 – TPC para o nó “Encaminhamento do Fluido” da RB para o evento #E2.....	320
Tab. 129 – TPC para o nó “#E2” da RB para o evento #E2	321
Tab. 130 – TPC para o nó “#E2” da RB para o evento #E2 (um compartimento).....	322
Tab. 131 – TPC para o nó “Bombeamento 1” da RB para o evento #E4.....	324
Tab. 132 – TPC para o nó “Bombeamento 2” da RB para o evento #E4.....	324
Tab. 133 – Probabilidades para os nós da RB na Fig. 49 que não apresentam TPC.....	325
Tab. 134 – TPC para o nó “D2” da RB na Fig. 49	325
Tab. 135 – TPC para os nós de atividade RB na Fig. 49	326
Tab. 136 – TPC para o nó “A1” da RB na Fig. 49	326
Tab. 137 – TPC para o nó “A2” da RB na Fig. 49	326
Tab. 138 – TPC para o nó “M1” da RB na Fig. 49.....	326
Tab. 139 – TPC para o nó “M2” da RB na Fig. 49.....	326
Tab. 140 – TPC para o nó “D1” da RB na Fig. 49	326
Tab. 141 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 49.....	326
Tab. 142 – Probabilidades para os nós da RB da Fig. 50 que não apresentam TPC.....	326
Tab. 143 – TPC para o nó “S3” da RB na Fig. 50	326
Tab. 144 – TPC para o nó “S5” da RB na Fig. 50	326
Tab. 145 – TPC para o nó “S8” da RB na Fig. 50	327
Tab. 146 – TPC para o nó “S7” da RB na Fig. 50	327

Tab. 147 – TPC para o nó “S17” da RB na Fig. 50.....	327
Tab. 148 – TPC para o nó “S16” da RB na Fig. 50.....	327
Tab. 149 – TPC para o nó “S10” da RB na Fig. 50.....	327
Tab. 150 – TPC para o nó “S11” da RB na Fig. 50.....	327
Tab. 151 – Probabilidade para o nó “A_C_5a_16” da RB na Fig. 52.....	327
Tab. 152 – TPC para o nó “S33” da RB na Fig. 52.....	327
Tab. 153 – TPC para o nó “M1” da RB na Fig. 52.....	327
Tab. 154 – TPC para o nó “A1” da RB na Fig. 52.....	327
Tab. 155 – Probabilidade para o nó “A_C_5a_17” da RB na Fig. 53.....	327
Tab. 156 – TPC para o nó de “S33” da RB na Fig. 53.....	327
Tab. 157 – Nós de equipamentos da RB da Fig. 58.....	328
Tab. 158 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 58.....	329
Tab. 159 – TPC para o nó “Atividade6” da RB na Fig. 58	329
Tab. 160 – TPC para o nó “Atividade7” da RB na Fig. 58	329
Tab. 161 – TPC para o nó “Atividade12” da RB na Fig. 58	329
Tab. 162 – TPC para o nó “Bombeamento1” da RB na Fig. 58.....	329
Tab. 163 – TPC para o nó “Bombeamento2” da RB na Fig. 58.....	329
Tab. 164 – TPC para o nó “Circuito_montante_da_bomba_1” da RB na Fig. 58.....	329
Tab. 165 – TPC para o nó “Atividade13” da RB na Fig. 58	330
Tab. 166 – TPC para o nó “Atividade17” da RB na Fig. 58	330
Tab. 167 – TPC para o nó “Atividade14” da RB na Fig. 58	330
Tab. 168 – TPC para o nó “Circuito_jusante_da_bomba_1” da RB na Fig. 58.....	331
Tab. 169 – TPC para o nó “Circuito_montante_da_bomba_2” da RB na Fig. 58.....	331
Tab. 170 – TPC para o nó “Circuito_jusante_da_bomba_2” da RB na Fig. 58.....	331
Tab. 171 – TPC para o nó “Encaminhamento_1” da RB na Fig. 58	332
Tab. 172 – TPC para o nó “Encaminhamento_2” da RB na Fig. 58	333
Tab. 173 – Nós apresentados no Apêndice H.....	335
Tab. 174 – Nós de equipamentos da RB na Fig. 61.....	335
Tab. 175 – TPC para o nó “CIRCUITO_1” da RB na Fig. 61.....	335
Tab. 176 – TPC para o nó “CIRCUITO_2” da RB na Fig. 61.....	336
Tab. 177 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 61.....	336
Tab. 178 – TPC para o nó “Atividade15” da RB na Fig. 61	336
Tab. 179 – TPC para o nó “Atividade16” da RB na Fig. 61	336
Tab. 180 – TPC para o nó “Circuito_montante_da_bomba_3” da RB na Fig. 61.....	336
Tab. 181 – TPC para o nó “Circuito_jusante_da_bomba_3” da RB na Fig. 61	336
Tab. 182 – TPC para o nó “Atividade6” da RB na Fig. 61	336
Tab. 183 – TPC para o nó “Atividade13” da RB na Fig. 61	337

Tab. 184 – TPC para o nó “Atividade7” da RB na Fig. 61	337
Tab. 185 – TPC para o nó “Encaminhamento_3” da RB na Fig. 61	337
Tab. 186 – TPC para o nó “Bombeamento3” da RB na Fig. 61	339
Tab. 187 – TPC para o nó “Atividade12” da RB na Fig. 61	339
Tab. 188 – TPC para o nó “Atividade14” da RB na Fig. 61	340
Tab. 189 – Nós apresentados no Apêndice I	342
Tab. 190 – Nós de equipamentos e ações humanas da RB na Fig. 62.....	342
Tab. 191 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 62.....	342
Tab. 192 – TPC para o nó “Atividade10” da RB na Fig. 62	343
Tab. 193 – TPC para o nó “Atividade8” da RB na Fig. 62	343
Tab. 194 – TPC para o nó “Atividade11A” da RB na Fig. 62.....	343
Tab. 195 – TPC para o nó “Atividade5” da RB na Fig. 62	343
Tab. 196 – TPC para o nó “Atividade9” da RB na Fig. 62	343
Tab. 197 – TPC para o nó “Atividade11B” da RB na Fig. 62.....	343
Tab. 198 – Nós de equipamentos e ações humanas da RB na Fig. 63.....	344
Tab. 199 – TPC para o nó “Atividade11A” da RB na Fig. 63.....	344
Tab. 200 – TPC para o nó “Atividade11B” da RB na Fig. 63.....	344
Tab. 201 – Nós apresentados nos Apêndices I e J	345
Tab. 202 – Nós de equipamentos e ações humanas da RB na Fig. 64.....	345
Tab. 203 – TPC para os nós “ST1_3”, “ST1_4”, “ST1_5” e “ST1_6” da RB na Fig. 64.....	345
Tab. 204 – TPC para os nós “ST3_1” e “ST3_2” da RB na Fig. 64	345
Tab. 205 – TPC para o nó “Atividade4F” da RB na Fig. 64	346
Tab. 206 – TPC para o nó “Atividade4B” da RB na Fig. 64.....	346
Tab. 207 – TPC para o nó “Atividade4A” da RB na Fig. 64.....	346
Tab. 208 – TPC para o nó “Atividade4C” da RB na Fig. 64.....	346
Tab. 209 – TPC para o nó “Atividade4D” da RB na Fig. 64.....	346
Tab. 210 – TPC para o nó “Atividade4E” da RB na Fig. 64.....	346
Tab. 211 – TPC para o nó “Atividade3” da RB na Fig. 64	346
Tab. 212 – TPC para o nó “Atividade2” da RB na Fig. 64	346
Tab. 213 – TPC para o nó “Atividade4” da RB na Fig. 64	346
Tab. 214 – TPC para o nó “Atividade11A” da RB na Fig. 64.....	346
Tab. 215 – TPC para o nó “Atividade11B” da RB na Fig. 64.....	346
Tab. 216 – TPC para o nó “Atividade15” da RB na Fig. 64	347
Tab. 217 – TPC para o nó “Atividade16” da RB na Fig. 64	347
Tab. 218 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 64.....	347
Tab. 219 – Nós de ações humanas da RB na Fig. 65.....	348
Tab. 220 – TPC para o nó “Atividade4F” da RB na Fig. 65.....	348

Tab. 221 – TPC para o nó “Atividade15” da RB na Fig. 65	348
Tab. 222 – TPC parcial para o nó “Atividade16” da RB na Fig. 65.....	348

LISTA DE ACRÔNIMOS

<i>ACH</i>	–	<i>Análise de Confiabilidade Humana</i>
<i>AIChE</i>	–	<i>American Institute of Chemical Engineers</i>
<i>APJ</i>	–	<i>Absolute Probability Judgment</i>
<i>APOA</i>	–	<i>Assessed Proportion of Affect</i>
<i>APS</i>	–	<i>Análise Probabilística de Segurança</i>
<i>ASEP</i>	–	<i>Accident Sequence Evaluation Program</i>
<i>ATHEANA</i>	–	<i>A Technique for Human Event Analysis</i>
<i>CAHR</i>	–	<i>Connectionism Assessment of Human Reliability</i>
<i>CARA</i>	–	<i>Controller Action Reliability Assessment</i>
<i>CBDT</i>	–	<i>EPRI Cause-Based Decision Tree</i>
<i>CDF</i>	–	<i>Core Damage Frequency</i>
<i>CESA</i>	–	<i>Commission Errors Search and Assessment</i>
<i>COCOM</i>	–	<i>Contextual Control Model</i>
<i>CODA</i>	–	<i>Conclusions from occurrences by descriptions of actions</i>
<i>CORE-DATA</i>	–	<i>Computerized Operator Reliability and Error Database</i>
<i>COSIMO</i>	–	<i>Cognitive Simulation Model</i>
<i>CPC</i>	–	<i>Common Performance Condition</i>
<i>CREAM</i>	–	<i>Cognitive Reliability and Error Analysis Method</i>
<i>CT</i>	–	<i>Canal de Transferência</i>
<i>CTMSP</i>	–	<i>Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo</i>
<i>DAG</i>	–	<i>Directed Acyclic Graph</i>
<i>DNV</i>	–	<i>Det Norske Veritas</i>
<i>DREAMS</i>	–	<i>Dynamic Reliability Technique for Error Assessment in Man-machine Systems</i>
<i>EBT</i>	–	<i>Enhanced Bayesian THERP</i>
<i>EC</i>	–	<i>Elemento Combustível</i>
<i>EF</i>	–	<i>Error Factor</i>
<i>EPC</i>	–	<i>Error Producing Conditions</i>
<i>EPRI</i>	–	<i>Electric Power Research Institute</i>
<i>EPUSP</i>	–	<i>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</i>
<i>FDP</i>	–	<i>Função Densidade de Probabilidade</i>
<i>FLIM</i>	–	<i>Failure Likelihood Index Methodology</i>
<i>FMEA</i>	–	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>

<i>FMECA</i>	–	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>
<i>GEMS</i>	–	<i>Generic Error Modeling System</i>
<i>GOMS</i>	–	<i>Goals, Operators, Methods and Selection Rules</i>
<i>GTT</i>	–	<i>Generic Task Type</i>
<i>HCR</i>	–	<i>Human Cognitive Reliability</i>
<i>HCR/ORE</i>	–	<i>Human Cognitive Reliability / Operator Reliability Experiments Method</i>
<i>HEART</i>	–	<i>Human Error Assessment and Reduction Technique</i>
<i>HEP</i>	–	<i>Human Error Probabilities</i>
<i>HF PFMEA</i>	–	<i>Human Factors Process Failure Modes & Effects Analysis</i>
<i>HMI</i>	–	<i>Human-Machine Interface</i>
<i>HRA</i>	–	<i>Human Reliability Analysis</i>
<i>HRMS</i>	–	<i>Human Reliability Management System</i>
<i>HSE</i>	–	<i>Health and Safety Executive</i>
<i>HTA</i>	–	<i>Hierarchical Task Analysis</i>
<i>HuRECA</i>	–	<i>Human Reliability Evaluator for Control Room Actions</i>
<i>IA</i>	–	<i>Inteligência Artificial</i>
<i>ICT</i>	–	<i>Information and Communication Technologies</i>
<i>IDAC</i>	–	<i>Information, Decision and Action in Crew Context</i>
<i>IHM</i>	–	<i>Interface Homem-Máquina</i>
<i>INTENT</i>	–	<i>Método para estimar a probabilidade de erro de comissão</i>
<i>JHEDI</i>	–	<i>Justified Human Error Data Information</i>
<i>K-HRA</i>	–	<i>A Standard HRA Method for PSA in Nuclear Power Plant</i>
<i>LABRISCO</i>	–	<i>Laboratório de Análise de Risco (EPUSP)</i>
<i>MATLAB</i>	–	<i>Software para cálculo numérico</i>
<i>MERMOS</i>	–	<i>Méthode d'évaluation de la réalisation des missions opérateurs pour la sûreté</i>
<i>MMC</i>	–	<i>Método de Monte Carlo</i>
<i>MOF</i>	–	<i>Management and Organizational Factors</i>
<i>NARA</i>	–	<i>Nuclear Action Reliability Assessment</i>
<i>NASA</i>	–	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NETICA</i>	–	<i>Software para a programação de RB</i>
<i>NPP</i>	–	<i>Nuclear Power Plant</i>
<i>OATS</i>	–	<i>Operator Action Tree System</i>
<i>ORCA</i>	–	<i>Operator Reliability Calculation and Assessment</i>
<i>P&ID</i>	–	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>

<i>PC</i>	–	<i>Paired Comparisons</i>
<i>PC</i>	–	<i>Prédio do Combustível</i>
<i>PEC</i>	–	<i>Piscina de Estocagem de Combustível</i>
<i>PRA</i>	–	<i>Probabilistic Risk Assessment</i>
<i>PSA</i>	–	<i>Probabilistic Safety Assessment</i>
<i>PSF</i>	–	<i>Performance Shaping Factor</i>
<i>PWR</i>	–	<i>Pressurized Water Reactor</i>
<i>QRA</i>	–	<i>Quantitative Risk Assessment</i>
<i>RB</i>	–	<i>Rede Bayesiana</i>
<i>SA</i>	–	<i>Sistema de Amostragem</i>
<i>SAC</i>	–	<i>Sistema de Ar Comprimido</i>
<i>SARS</i>	–	<i>Sistema de Água de Resfriamento de Segurança</i>
<i>SC</i>	–	<i>Sala de Controle</i>
<i>SD</i>	–	<i>Sistema de Drenagem</i>
<i>SE</i>	–	<i>Sistema Elétrico</i>
<i>SHARP</i>	–	<i>Systematic Human Action Reliability Procedure</i>
<i>SLIM</i>	–	<i>Success Likelihood Index Methodology</i>
<i>SLP</i>	–	<i>Sistema de Limpeza e Purificação</i>
<i>SPAR-H</i>	–	<i>Standard Plant Analysis Risk HRA</i>
<i>SRK</i>	–	<i>Skill-Rule-Knowledge Model</i>
<i>SRPEC</i>	–	<i>Sistema de Resfriamento da Piscina de Estocagem de Combustível</i>
<i>STAHR</i>	–	<i>Socio-Technical Assessment of Human Reliability</i>
<i>TPC</i>	–	<i>Tabela de Probabilidades Condicionais</i>
<i>TECHR</i>	–	<i>Technique for Early Consideration of Human Reliability</i>
<i>TESEO</i>	–	<i>Empirical Technique for Estimating Operator Errors</i>
<i>THERP</i>	–	<i>Technique for Human Error Rate Prediction</i>
<i>TMI</i>	–	<i>Three-Mile Island</i>
<i>TRC</i>	–	<i>Time Reliability Correlation</i>
<i>UMH</i>	–	<i>University of Maryland Hybrid</i>
<i>USP</i>	–	<i>Universidade de São Paulo</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_A_$	–	<i>Designa uma ação do domínio afetivo</i>
$A_C_$	–	<i>Designa uma ação do domínio cognitivo</i>
$A_P_$	–	<i>Designa uma ação do domínio psicomotor</i>
l	–	<i>Número de tipos de erros associados a uma ação</i>
$EG_$	–	<i>Designa um erro genérico</i>
NC	–	<i>Número de combinações</i>
NTC	–	<i>Número total de combinações</i>
$\neg$	–	<i>Indica a não ocorrência de um evento</i>
$\#$	–	<i>Indica um evento da árvore de eventos</i>
λ	–	<i>Frequência</i>
Φ	–	<i>Designa uma população</i>
φ	–	<i>Designa uma subpopulação</i>
θ	–	<i>Parâmetros de uma distribuição</i>
$\phi(p)$	–	<i>Variabilidade populacional de p</i>
μ, σ	–	<i>Parâmetros da distribuição normal</i>
μ_y, σ_y	–	<i>Parâmetros da distribuição normal associada à lognormal</i>
X_i	–	<i>e.g.; variável (variáveis são apresentadas em letra maiúscula)</i>
x_i	–	<i>e.g.; estado da variável X_i (eventos e estados de variáveis são apresentados em letra minúscula)</i>
$P(X_i)$	–	<i>Probabilidade de X_i</i>

1 INTRODUÇÃO

Um sistema é uma construção ou um conjunto de elementos diferentes que, quando juntos, produzem resultados que não podem ser alcançados pelos mesmos elementos quando isolados. Os elementos ou componentes do sistema podem incluir pessoas, equipamentos, *software*, instalações, políticas e documentos, i.e., aquilo que é necessário para produzir os resultados esperados do sistema: qualidade, propriedades, características, comportamento e desempenho (NASA, 2007),

Entre outras formas, os sistemas podem ser classificados como *simples* ou *complexos* (NORMAN; KURAS, 2006). Os *sistemas simples* são aqueles que podem ser modelados de forma direta, i.e., em que o exame de seus componentes e inter-relações provê uma descrição de sua complexidade, permitindo o entendimento do seu funcionamento como um todo; há linearidade entre o previsto na sua concepção e o comportamento real do sistema (ABBOTT, 2007). O mesmo não pode ser dito sobre os sistemas complexos.

O comportamento e as propriedades característicos dos sistemas complexos não são descritíveis de forma simples, fechada ou como uma função matemática do comportamento e das propriedades dos seus componentes (NORMAN; KURAS, 2006). Estas características levam às incertezas relacionadas ao comportamento dos elementos do sistema que precedem a exposição ao ambiente operacional, tanto em relação a seus próprios componentes, quanto em relação aos elementos da natureza circunvizinhos (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015), contribuindo para que 80% dos custos e problemas observados ao longo da vida útil dos sistemas sejam criados no desenvolvimento do produto – i.e., custo e qualidade são essencialmente atribuídos aos produtos no seu estágio de concepção (PAHL et al., 2007).

Sendo assim, o conhecimento incompleto da natureza é limitante para o projeto de sistemas quando há preocupação com a restrição de perdas. Apesar da dificuldade de tratamento das incertezas durante a concepção de sistemas complexos, o risco associado à operação de sistemas críticos deve ser limitado – em geral, em atendimento a um critério de projeto como, por exemplo, o limite para a

frequência de dano ao núcleo do reator em plantas nucleares (USNRC, 2014). O campo da engenharia dedicado ao desenvolvimento e à aplicação de técnicas para lidar com esta limitação em projetos é a *análise de risco*. A *análise de risco* se compõe dos núcleos de *avaliação*, de *gerenciamento* e de *comunicação de risco* (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 2010). Estes núcleos possuem muitas inter-relações e interdependências, tornando necessário o desenvolvimento de metodologias estruturadas para facilitar o fluxo e a apresentação da informação na análise de sistemas complexos.

A *análise de risco* consiste basicamente no estudo da chance ou frequência da perda e de sua magnitude. A metodologia quantitativa empregada nesta análise é chamada *Probabilistic Risk Assessment* (PRA), ou *Probabilistic Safety Assessment* (PSA) ou *Quantitative Risk Assessment* (QRA) (HAYNS, 1999) – a primeira expressão tem origem na indústria nuclear dos EUA (USNRC, 1975), enquanto as últimas são originárias da Europa e da indústria de processos, respectivamente. A expressão *Probabilistic Safety Assessment* (PSA) é utilizada na indústria nuclear brasileira como *Análise Probabilística de Segurança* (APS), em português. Nesta tese, consistentemente com o estudo de caso apresentado (foi abordado um problema da indústria nuclear), será utilizada a expressão *Análise Probabilística de Segurança* (APS).

A APS de instalações industriais é assunto que evoluiu com a complexidade dos sistemas (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015), sendo considerada uma metodologia lógica, abrangente e estruturada, focada na identificação e avaliação dos riscos de sistemas tecnológicos complexos, com o propósito final de melhorar suas características de segurança e desempenho, mantendo uma relação custo-benefício aceitável (NASA, 2011). Apesar de estar em constante desenvolvimento (INGEMARSON, 2006; OECD/NEA, 2012), em muitos aspectos a APS é considerada uma metodologia madura (HAYNS, 1999), tendo assumido seus contornos atuais ainda no período de 1975 a 1985 – em particular com os trabalhos realizados na área nuclear (HAYNS, 1999; USNRC, 1975 e 1990).

A despeito dos reconhecidos benefícios da aplicação da APS nos estágios iniciais de projeto (IAEA, 2001), há controvérsia sobre se a APS, como apresentada atualmente, pode ser descrita como uma *ferramenta de projeto* (HIRSCHBERG, 1990; HAYNS, 1999). Considera-se, geralmente, que as maiores limitações da APS

estão nos tópicos sobre dependência entre falhas – e.g., múltiplas falhas com causa comum – e sobre o fator humano (HIRSCHBERG, 1990). Além disto, há resistência aos seus resultados quantitativos (IAEA, 1999), visto que a demanda substancial por dados, nem sempre disponíveis, pode levar a suposições não triviais para viabilizar as análises (GREENBERG et al., 2012).

A sub-área da engenharia de fatores humanos empregada na APS é denominada Análise de Confiabilidade Humana (ACH) – ou HRA, do inglês *Human Reliability Analysis*. As primeiras técnicas desenvolvidas para a ACH, denominadas modelos de 1º geração [e.g., THERP (SWAIN; GUTTMANN, 1983)], têm o intuito principal de fornecer dados quantitativos para a APS. Este foco se justifica pela necessidade da APS de alimentar modelos (e.g., *árvores de falhas* e *árvores de eventos*) com dados sobre a falha dos elementos do sistema, tanto equipamentos quanto humanos, para calcular a chance ou frequência de uma perda de interesse (NASA, 2011). Assim como a probabilidade de falha dos equipamentos do sistema permite estimar sua confiabilidade, as técnicas para ACH associam ao elemento humano uma probabilidade de erro denominada HEP (*Human Error Probability*) que permite o cálculo de sua confiabilidade.

Em virtude das deficiências apresentadas pelas técnicas de ACH de primeira geração (e.g., consideração incipiente de dependências; dificuldades em obter dados estatísticos; divergências sobre a área de aplicação; desconsideração de fatores cognitivos), diversos modelos foram propostos ao longo dos anos, tanto quantitativos quanto qualitativos, alguns ainda em desenvolvimento. Até 2005, Hollnagel (2005) registrou aproximadamente 35 técnicas, sendo que revisões mais recentes demonstram um aumento significativo deste número.

As técnicas de ACH são aplicáveis às diferentes fases do ciclo de vida dos sistemas, sendo que, para a fase de projeto, é observada a preferência pelo desenvolvimento de técnicas qualitativas, o que limita a exploração de seus resultados através de comparações da relação custo-benefício de alternativas para o projeto (IMO, 2013). Czaja e Nair, em artigo publicado no *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (CZAJA; NAIR, 2012), listaram os seguintes obstáculos para a consideração do fator humano no projeto de sistemas complexos, atribuídos às pessoas envolvidas no projeto (e.g., gerentes de projeto, engenheiros e projetistas):

- Ideia de que a consideração dos fatores humanos pode comprometer tecnicamente o sistema;
- Percepção de que os seres humanos são adaptáveis aos requisitos do sistema;
- Ideia de que o estudo dos fatores humanos gera pouca informação útil para o projeto;
- Prática de considerar os fatores humanos apenas na fase de avaliação do produto, ou sua desconsideração;
- Definição vaga de requisitos de projeto no que tange ao elemento humano (e.g., elaboração de requisitos aplicáveis a uma parte específica do projeto ou muito genéricos).

A prática de considerar os fatores humanos apenas na fase de avaliação do produto faz com que seja observado o fenômeno “*too little, too late*” (LIM; LONG; SILCOCK, 1992), i.e., muitas vezes os resultados dos estudos realizados após a concepção são ignorados, ou porque são considerados insignificantes ou porque, quando representativos, é muito tarde para justificar a volta à fase de concepção para a alteração do projeto (SALVENDY, 2006). Apesar destes obstáculos, o uso dos resultados da APS e da ACH para a comparação de alternativas de projeto foi aplicado ou identificado como importante em uma variedade de áreas (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015) – e não é um conceito novo (HANNAMAN, 1986; BORING; JOE, 2014). Ademais, a importância de considerar o fator humano na concepção dos sistemas – i.e., projetar as plantas para o homem, em vez de adaptar o homem aos processos (CARNINO, 1985) – também é consensual desde os primeiros anos de desenvolvimento da APS (ABO; MAGED; RAOUF, 1979; PAPIN, 2011) – sendo necessário que, para tanto, o engenheiro de fatores humanos trabalhe em conjunto com o analista de confiabilidade humana (BORING, 2007; KENNEDY et al., 2007; DE LA GARZA; LABARTHE; GRAGLIA, 2012). O estudo das APS realizadas em várias indústrias ajuda a entender o consenso em torno destes conceitos (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015). Entretanto, para que este potencial seja explorado, faz-se necessária a elaboração de modelos (SHORROCK; KIRWAN, 2002) e procedimentos quantitativos, simples, realistas, capazes de alimentar análises ainda na fase de concepção, e que tragam resultados que possam ser interpretados pelos

profissionais envolvidos no processo de projeto, tornando-se instrumentos para a tomada de decisão.

Atualmente, apesar da dificuldade para a consideração da confiabilidade em projetos inovadores (em função da falta de dados sobre o comportamento das novas tecnologias empregadas – e.g., *software*, sistemas de controle), é possível encontrar publicações com soluções com estas características para o caso da confiabilidade de equipamentos – e.g., NASA (1995a, 1995b). Isto não é observado para o caso da confiabilidade humana (NASA, 2007; NORMAN; KURAS, 2006). Evidencia-se, portanto, a necessidade de técnicas quantitativas para a consideração da confiabilidade humana na fase de concepção de sistemas complexos, constituindo-se em um forte apelo para o seu desenvolvimento.

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Os parágrafos acima delinearam o estado da arte da concepção de sistemas baseada em dados incertos. O presente trabalho foi motivado pelas necessidades discriminadas nesta contextualização. Assim sendo, os objetivos delimitados para este trabalho foram os seguintes:

- Investigar formas para a consideração da confiabilidade humana na concepção de sistemas complexos;
- Desenvolver um procedimento para a concepção de sistemas que considere a confiabilidade dos seus elementos e suas interdependências, e que seja quantitativo, simples, realista e capaz de alimentar análises ainda na fase de concepção;
- Desenvolver uma técnica quantitativa para a consideração da confiabilidade humana na fase de concepção de sistemas complexos, que facilite a integração do trabalho do engenheiro de fatores humanos e do analista de confiabilidade humana;
- Desenvolver um modelo prospectivo de desempenho humano para apoiar a consideração da confiabilidade humana na concepção de sistemas, e que seja atualizável.

Os resultados específicos deste trabalho são comentados nas últimas seções

de cada capítulo. Destacam-se, de forma geral, as seguintes contribuições originais deste trabalho para o estado da arte da concepção de sistemas baseada em dados incertos:

- Desenvolvimento da TECHR (*Technique for Early Consideration of Human Reliability*) – técnica quantitativa para a consideração da confiabilidade humana na fase inicial do projeto de sistemas, focada na elaboração de modelos prospectivos de desempenho humano quantitativos, classificando os erros e as ações humanas segundo as taxonomias de Reason (1990) e de Bloom (1956), respectivamente;
- Desenvolvimento de uma metodologia para a concepção de sistemas que facilita a consideração da confiabilidade humana e que permite a comparação das relações custo-benefício das alternativas de projeto – demonstrando ser possível considerar, de forma simples e quantitativa, a confiabilidade humana ainda na fase de concepção, sem acrescentar dificuldades ao processo de projeto;
- Desenvolvimento de um modelo prospectivo de desempenho humano pela aplicação da TECHR que permite associar uma estimativa preliminar de HEP a uma ação qualquer. O modelo obtido é integrado por meio de redes bayesianas (RB) – para a exploração direta de recursos de atualização bayesiana, tanto na simulação durante a concepção quanto na atualização do modelo em fases mais adiantadas do projeto – e foi construído com base nas informações disponíveis em diferentes técnicas de ACH;
- Emprego da metodologia e do modelo descritos nos tópicos anteriores em dois casos concretos que tratam, respectivamente, da obtenção de um procedimento operacional e de toda a configuração do SRPEC (Sistema de Resfriamento da Piscina de Estocagem de Combustível). A PEC (Piscina de Estocagem de Combustível) estoca os EC (Elemento Combustível) recém-removidos de um reator nuclear do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), que ainda produzem calor (devido ao decaimento dos produtos de fissão) e podem contaminar a água que os resfria. Desta forma, a PEC e seus sistemas auxiliares (e.g. SRPEC) são projetados com o propósito de manter a integridade dos EC (para impedir a liberação desses produtos de fissão).

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Além deste capítulo introdutório, o texto desta tese se apresenta em oito capítulos, conforme descritos abaixo:

- *Capítulo 2 – Tópicos teóricos*: este capítulo se inicia com um panorama geral da ACH, discutindo sua evolução e salientando a questão da fiabilidade dos dados quantitativos resultantes da aplicação das técnicas disponíveis. Na sequência, este capítulo discute as RB, os métodos de combinação e a atualização bayesiana – tópicos fundamentais para o entendimento dos modelos desenvolvidos ao longo desta tese. Para finalizar, são discutidos os termos *sistema complexo* e *taxonomia* no contexto deste trabalho;
- *Capítulo 3 – Metodologia para a concepção de sistemas*: neste capítulo é apresentada uma metodologia para a concepção de sistemas complexos considerando a confiabilidade humana. Em princípio são detalhadas as atividades propostas em cada uma de suas nove etapas cíclicas e interdependentes e, na sequência, com o propósito de facilitar o entendimento destas etapas, é apresentado um exemplo simplificado de emprego da metodologia na concepção de um sistema de resfriamento;
- *Capítulo 4 – Technique for Early Consideration of Human Reliability (TECHR)*: este capítulo inicia a descrição da TECHR, apresentando o equacionamento necessário para o levantamento e atualização das curvas de probabilidades para os diversos tipos de erro considerados em um modelo prospectivo de desempenho humano, partindo de uma série de curvas de probabilidades de HEP. Este capítulo traz também um exemplo simples de aplicação deste equacionamento, considerando algumas HEP extraídas de Swain e Guttman (1983) e os tipos de erro humano listados por Reason (1990);
- *Capítulo 5 – Aplicação da TECHR: banco de probabilidades dos tipos de erro humano*: diferentemente do exemplo simples apresentado no Capítulo 4, traz os dados obtidos para todos os tipos de erro relacionados por Reason (1990) considerando diversas fontes de HEP – e.g., opinião de especialistas, dados de simuladores e outras informações sobre sistemas

- que operam ou operaram nos últimos anos, implícitas tanto em APS quanto em técnicas de ACH e suas aplicações, selecionadas segundo um critério que leva em consideração a disponibilidade do respectivo banco de dados e a origem de sua base de dados, discutindo as técnicas de ACH no contexto deste trabalho;
- *Capítulo 6 – Aplicação da TECHR: modelo prospectivo de desempenho humano:* para encerrar a descrição da TECHR, este capítulo apresenta o equacionamento necessário para a combinação das curvas de probabilidades de diversos tipos de erro para a estimativa da HEP associada a uma ação específica e, com base neste equacionamento e no banco de dados apresentado no Capítulo 5, desenvolve um modelo prospectivo para o desempenho humano de ações genéricas classificadas conforme critérios fundamentados na taxonomia de Bloom (BLOOM et al., 1956; KRATHWOHL; BLOOM; MASIA, 1969; HARROW, 1972) – para cada ação, discriminando seus possíveis tipos de erro e associando uma função densidade de probabilidade para a HEP. Além de que, este capítulo traz alguns exemplos simples de emprego do modelo prospectivo apresentado e uma discussão sobre suas formas de alteração, tanto para a inclusão de observações de campo quanto para a consideração de novas bases de dados.
 - *Capítulo 7 – Concepção da operação do SRPEC:* este capítulo traz a aplicação da metodologia referida no Capítulo 3 – subsidiada pelos resultados apresentados no Capítulo 6 (que expõem um modelo prospectivo de desempenho humano obtido por meio da TECHR) – na concepção de um procedimento operacional para o SRPEC, definindo a configuração dos fatores humanos sem alterar os equipamentos pré-estabelecidos para este sistema;
 - *Capítulo 8 – Concepção do SRPEC completo:* este capítulo traz a aplicação da metodologia referida no Capítulo 3, subsidiada pelos resultados apresentados no Capítulo 6. Desta forma, este capítulo apresenta a concepção do SRPEC, definindo de forma preliminar a configuração tanto dos fatores humanos quanto dos equipamentos que podem compor este sistema;
 - *Capítulo 9 – Conclusões e recomendações para trabalhos futuros:* além de

apresentar os pontos fortes da metodologia e da TECHR observados em sua aplicação, este capítulo apresenta os seus pontos fracos e, com base nesta discussão, são feitas recomendações para trabalhos futuros.

2 TÓPICOS TEÓRICOS

Sempre que possível, os fundamentos teóricos considerados essenciais para o entendimento deste trabalho serão explicitados ao longo dos capítulos, conforme demandados. Alguns tópicos, entretanto, foram separados para não prejudicar a fluidez do texto, sendo apresentados neste capítulo em cinco seções: 2.1) Análise de confiabilidade humana; 2.2) Redes bayesianas – texto adaptado de Maturana (2010); 2.3) Combinação e atualização bayesiana de dados; 2.4) Discussão sobre o termo *sistema complexo* no contexto desta tese; e 2.5) Discussão sobre o termo *taxonomia* no contexto desta tese. Ressalte-se que estas seções não estão necessariamente relacionadas umas às outras e não seguem uma ordem específica.

2.1 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA (ACH)

A ACH envolve atividades de análise com a aplicação de técnicas específicas para cada etapa de seu processo, podendo ser quantitativa ou qualitativa, dependendo do nível de APS que está sendo realizado. Em geral, se for requerida uma análise quantitativa, as HEP são determinadas com base em dados empíricos, simulações e/ou opinião de especialistas, para alimentar modelos tais como árvores de falhas e de eventos (IMO, 2013). Usualmente, a ACH consiste nas seguintes etapas: 1) Identificação de tarefas-chave; 2) Análise das tarefas-chave; 3) Identificação dos erros humanos; 4) Análise dos erros humanos; e 5) Quantificação da confiabilidade humana. A Tab. 1 apresenta as relações entre os passos da APS e as etapas previstas para a ACH (IMO, 2013), com breves descrições das tarefas requeridas em cada passo (MARTINS; MATURANA, 2010).

Com o passar dos anos, a necessidade de avaliar o desempenho humano resultou no desenvolvimento de diversas técnicas dedicadas à ACH. A compreensão do conjunto destas técnicas pode ser obtida pelo estudo da evolução histórica da ACH. É interessante, por exemplo, notar a forte conexão entre o acidente em TMI (*Three-Mile Island*) (USGAO, 1980), em 28 de março de 1979, e o crescimento do número de técnicas para ACH – conforme apontado por Hollnagel (2005). O acidente em TMI é considerado um marco, já que, a partir dele, o fator humano se tornou uma das principais preocupações, tanto no projeto de salas de controle como em outros pontos das centrais nucleares, constituindo-se em um aspecto relevante das APS a ser ponderado nas decisões de licenciamento destas plantas (USNRC,

2014). Em anos posteriores, os estudos de acidentes graves – e.g., em Bhopal (1983), Chernobyl (1986), Fukushima (2011) – reforçaram a necessidade de aprimorar o desenvolvimento das técnicas de ACH e a importância do fator humano como última barreira de segurança em centrais nucleares (MADONNA et al., 2009; SCHROER; MODARRES, 2013; MOSLEH, 2014; OECD/NEA, 2015).

Tab. 1 – Passos da APS e da ACH [adaptada de Martins e Maturana (2010)]

Passos da APS	Tarefas Requeridas para a Incorporação da ACH	Breve Descrição das Atividades de ACH
Passo 1 Identificação o dos Perigos	<ul style="list-style-type: none"> • Perigos Relacionados a Fatores Humanos; • Análise de Tarefas de Alto Nível; • Descrição Preliminar dos Resultados. 	As atividades de ACH concentram-se na identificação das ações humanas que, se não executadas apropriadamente, podem levar o sistema a falhar. Por meio de ampla investigação, identificam-se as áreas de interesse (tarefas e sub-tarefas) e como os erros humanos podem contribuir para os acidentes durante situações normais e de emergência. No desenvolvimento da análise das tarefas pode-se utilizar uma gama de técnicas – tais como entrevistas, observações, relatos de incidentes críticos – muitas das quais podem ser utilizadas diretamente na identificação de tarefas-chave. Adicionalmente, existe uma série de informações que podem ser consultadas, incluindo informações do projeto, experiências passadas e procedimentos de operação normais e em emergência. O resultado desta etapa é um conjunto de tarefas, sub-tarefas e atividades associadas a perigos críticos.
Passo 2 Análise de Risco	<ul style="list-style-type: none"> • Análise Detalhada das Tarefas Críticas; • Análise do Erro Humano; • Quantificação do Erro Humano. 	<p>Estas atividades relacionam-se à identificação de áreas em que o fator humano se coloca como de alto risco para a segurança do sistema e à avaliação dos fatores que influenciam no nível de risco, por exemplo:</p> <p>1) Análise Detalhada de Tarefas: refere-se ao detalhamento de tarefas críticas em suas atividades principais, levando em consideração os objetivos de cada atividade e seus executores. Nesta análise também devem ser considerados os fatores que influenciam na execução da tarefa – tais como ambiente de trabalho, grau de dificuldade, interface homem-máquina (IHM), se é feita em condições normais ou de emergência;</p> <p>2) Análise do Erro Humano: esta análise produz uma lista de potenciais erros humanos que podem levar a consequências indesejadas. Estes erros precisam ser analisados quanto a sua causa provável, o potencial para correção do erro pelo próprio executor ou por outra pessoa, e as consequências do erro; e</p> <p>3) Quantificação do Erro Humano: a quantificação é alcançada por meio de julgamento de especialistas, registros históricos e probabilidades genéricas de erro. Para estes dois últimos casos, existem técnicas associadas a banco de dados de erro humano, que serão avaliadas mais adiante (vide o Capítulo 5);</p>
Passo 3 Opções de Controle de Risco	<ul style="list-style-type: none"> • Opções de Controle de Risco para o Elemento Humano. 	Nesta atividade são definidas ações para a redução da frequência do erro por meio da mitigação de seus efeitos e/ou alívio das circunstâncias em que ocorre. O resultado esperado deste levantamento é uma série de opções de controle de risco a serem aplicadas no sistema – por exemplo: treinamento de operadores; melhora da IHM; especificação de informações a serem disponibilizadas e desenvolvimento de procedimentos de emergência.
Passo 4 Análise de Custo Benefício		
Passo 5 Recomendações para a Tomada de Decisão		

Os primeiros trabalhos de ACH surgiram na década de 50 (MEISTER, 1999), sendo que em 1962 foi apresentada uma versão preliminar da THERP (*Technique for Human Error Rate Prediction*) (SWAIN; GUTTMANN, 1983), primeira técnica

formal de ACH (BORING, 2012). Como demonstrado na Fig. 1 (HOLLNAGEL, 2005), as demais técnicas de ACH nasceram depois da APS pioneira publicada por Rasmussen em 1975 (USNRC, 1975; KIRWAN, 1994) e, em maior número, depois do acidente em TMI. Assim muitas técnicas emergiram nos anos 80, com maior crescimento em torno de 1984. As técnicas que surgiram até esta época são consideradas de 1ª geração. Este período foi acompanhado por outro menos acentuado em torno de 1996, com o aparecimento das chamadas técnicas de 2ª geração, tentando suprimir as críticas às técnicas de 1ª geração – e.g., modelagem dicotômica (MARTINS; MATURANA, 2013), consideração de erros de comissão, de dependências contextuais e de fatores cognitivos (USNRC, 2014).

Mais recentemente, surgiram as técnicas de ACH baseadas na simulação do desempenho humano [e.g., (MOSLEH; CHANG, 2004)] que não são classificáveis entre as técnicas de 1ª ou de 2ª geração. Estas técnicas apresentam bases dinâmicas, i.e., modelos que procuram reproduzir o comportamento humano independentemente de dados empíricos ou da opinião de especialistas (BORING, 2012), e, devido a suas características singulares, podem ser classificadas como técnicas de 3ª geração (FRENCH et al., 2011).

Fig. 1 – Número de técnicas para ACH até 2005 (HOLLNAGEL, 2005)

Porém, de acordo com as características das diversas técnicas de ACH, a classificação em gerações é questionável, i.e., muitas técnicas podem ser classificadas, de acordo com suas características, em gerações anteriores ou posteriores à da data de sua publicação (BORING, 2012; FRENCH et al., 2011).

Assim, a necessidade de avaliar o desempenho humano resultou no desenvolvimento de diversas técnicas dedicadas à ACH – uma discussão mais

ampla sobre suas características, contexto de desenvolvimento e limitações foi apresentada em trabalhos anteriores (MARTINS; MATURANA, 2009a, 2009b, 2013; MATURANA, 2010) e reconsiderados, no contexto deste trabalho, no Capítulo 5. Em 2009, o HSE (Health and Safety Executive) publicou um relatório (BELL; HOLROYD, 2009) em que são reconhecidas 72 técnicas dedicadas à ACH, sendo 35 quantitativas, e, desde então, novas técnicas foram e vêm sendo desenvolvidas (OECD/NEA, 2015), evidenciando a incapacidade das técnicas apresentadas até o momento de responder satisfatoriamente ou de forma consensual às persistentes críticas e necessidades enfrentadas pelos especialistas em ACH. Ressaltam-se as questões relacionadas a:

- **1) O contexto de aplicação das técnicas em relação àqueles de coleta de dados:** e.g., consideração do contexto (FORESTER et al., 2009; CHANDLER et al., 2006; ENERGY INSTITUTE, 2012; KIRWAN, 2007), exploração pobre de dados qualitativos disponíveis (OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010), extensão das análises em diferentes condições operacionais (MOSLEH, 2014; CHANDLER et al., 2006; OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010), necessidade de uma metodologia para situações não estudadas (MOSLEH, 2014; ENERGY INSTITUTE, 2012; OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010; ISAAC et al., 2002; QASIM; HARAHAP, 2013);
- **2) Fiabilidade¹ na base de dados e resultados quantitativos (CHANDLER et al., 2006; FORESTER et al., 2012; FORESTER et al., 2006; BORING et al., 2008; HAVLIKOVA; JIRGL; BRADAC, 2015):** e.g., variabilidade na predição da HEP, tanto entre técnicas diferentes quanto em relação à mesma técnica aplicada por especialistas diferentes (OECD/NEA, 2015; ENERGY INSTITUTE, 2012; KIRWAN, 2007; OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010), necessidade excessiva de opinião de especialistas, evidenciando a escassez de dados empíricos e quantitativos (FORESTER et al., 2009; ENERGY INSTITUTE, 2012;

¹ O termo *fiabilidade* foi empregado nesta tese para evitar a confusão com o termo *confiabilidade*. O primeiro termo designa a percepção de especialistas em relação às técnicas de ACH; o segundo, refere-se à propriedade de componentes e sistemas.

KIRWAN, 2007; HAVLIKOVA; JIRGL; BRADAC, 2015), indefinição de critérios consensuais para a avaliação da adequação do modelo obtido (OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010), incertezas nos resultados obtidos (Energy Institute, 2012; Lois et al., 2009; Bye et al., 2011; Dang et al., 2014), dificuldade de coleta de dados (FORESTER et al., 2009; OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010; CHANG et al., 2014); e

- **3) Pontos não cobertos, ou em desenvolvimento:** e.g., inadequação dos métodos atuais para a modelagem de tomada de decisão, de atividades de longo tempo, de atividades de execução única, controle e comando durante acidentes severos (MOSLEH, 2014; ISAAC et al., 2002), utilização de modelos e técnicas por não-especialistas em ACH e envolvimento do operador (FORESTER et al., 2009; CHANDLER et al., 2006; ENERGY INSTITUTE, 2012), desenvolvimento de modelos atualizáveis (MARTINS; MATURANA, 2013; ENERGY INSTITUTE, 2012; OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010; MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2015), disponibilidade de *software* que simule o comportamento humano (MOSLEH, 2014; FORESTER et al., 2009), consideração de dependências (MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2015), consideração de erros latentes (MOSLEH, 2014; FORESTER et al., 2009), adequação para emprego na fase de concepção (CHANDLER et al., 2006; OXSTRAND; BORING, 2009; OXSTRAND, 2010; WATERSON et al., 2014), modelagem de erros de comissão (MOSLEH, 2014; BORING; JOE, 2014).

Parte dos questionamentos enfrentados pelas técnicas de ACH surge da dificuldade em incluir dependências e considerar incertezas nos modelos quantitativos comumente utilizados (e.g., árvore de falhas). Como forma de melhorar esta modelagem, vem sendo discutido o emprego das RB (MARTINS; MATURANA, 2013) que, além de facilitar a combinação de diferentes fontes de informação (dados empíricos, opinião de especialista e modelos cognitivos), permite a atualização imediata do modelo quantitativo mediante novas informações (MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2015). Assim, considera-se emprego de RB na ACH é atrativo por uma série de razões – e.g., representação gráfica intuitiva, facilidade de representação de incertezas (MARTINS; MATURANA, 2013; MKRTCHYAN; PODOFILLINI; DANG, 2015). Neste trabalho, as RB auxiliam a organizar e a

apresentar as informações qualitativas e quantitativas disponíveis – permitem a rápida visualização das variáveis, estados e dependências consideradas – e a realizar os cálculos para a combinação e a atualização bayesiana de dados, facilitando o desenvolvimento e a apresentação de um modelo prospectivo de desempenho humano atualizável (vide os Capítulos 5 e 6).

Especificamente sobre a questão da fiabilidade dos dados quantitativos resultantes da aplicação das técnicas de ACH, recentemente multiplicaram-se as publicações com o intuito de avaliá-las entre si, frente a dados empíricos e em relação a sua adequação às áreas em que a ACH desempenha papel fundamental – e.g., nuclear (OECD/NEA, 2015; BORING, 2012; OXSTRAND, 2010; FORESTER et al., 2006; LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014; BORING et al., 2008; BORING; JOE, 2014; HENDRICKSON et al., 2012), transporte aéreo (KIRWAN, 2007), transporte ferroviário (RANGRA et al., 2015; WREATHALL et al., 2003), indústria offshore (MOURA et al., 2014), setor aeroespacial (CHANDLER et al., 2006), construção civil (QASIM; HARAHA, 2013), segurança no trabalho (MADONNA et al., 2009; BELL; HOLROYD, 2009), área da saúde (LYONS, 2004). De forma geral, as diversas avaliações concluem que as técnicas apresentam vantagens e desvantagens, apontando situações em que cada técnica pode apresentar seu melhor desempenho, e amenizam o impacto do resultado quantitativo propriamente dito, ressaltando o poder comparativo e o acréscimo de conhecimento sobre as questões de segurança, obtidos pela aplicação da ACH.

2.2 REDES BAYESIANAS

As redes bayesianas (RB), também conhecidas como redes de opinião, redes causais, gráficos de dependência probabilística, são modelos gráficos para raciocínio baseado na incerteza, onde os nós representam as variáveis discretas ou contínuas, e os arcos representam a conexão direta entre eles (CHARNIAK, 1991). Elas foram desenvolvidas no início dos anos 80 para facilitar a tarefa de predição e abdução em sistemas de Inteligência Artificial (IA) (PEARL, 1988) e vêm se tornando a ferramenta padrão para a construção dos sistemas que confiam no conhecimento probabilístico, sendo aplicáveis a uma variedade de atividades (e.g., medicina,

engenharia).

As RB são uma maneira sucinta para representar conjunções de probabilidades. De modo direto e estruturado, apresentam as dependências entre as variáveis de um domínio. Esta representação leva este nome porque trabalha com conhecimento incerto e incompleto, tratado inicialmente por meio da teoria de probabilidade bayesiana – publicada por Thomas Bayes, em 1763. As RB são particularmente úteis para a representação de domínios em que existem informações a respeito de dependência condicional entre suas variáveis. Partindo deste tipo de informação é possível, então, a representação compacta do domínio.

Nesta seção, as RB serão apresentadas em sua estrutura e conceitos básicos. Para o melhor entendimento de sua aplicação na metodologia de concepção (vide o Capítulo 3), serão discutidas as técnicas para inferência e a modelagem por meio de RB – ressalte-se que a questão da atualização bayesiana será retomada na próxima seção, para facilitar o entendimento do método de combinação e atualização de dados empregado na TECHR. Assim, esta seção não se destina a esgotar o tema, mas apenas a servir de apoio para a compreensão da metodologia e da técnica desenvolvidos nesta tese.

2.2.1 Conceitos básicos

Dado um evento e , o conceito de sua probabilidade é a medida da frequência com que e ocorre – nesta subseção, os eventos serão representados por letras minúsculas e as variáveis e nós, por maiúsculas. Outra interpretação de probabilidade representa o grau de crença de uma pessoa de que determinado evento irá ocorrer em um experimento único. A interpretação de probabilidade como frequência em uma série de experimentos repetidos é referida como interpretação objetiva. De outra forma, a interpretação de probabilidade como grau de crença é chamada de interpretação subjetiva ou bayesiana. Assim, na interpretação bayesiana, a probabilidade sempre dependerá do conhecimento de quem a provê ou do que esta pessoa assume ser verdade.

Uma RB é um grafo direcionado em que cada nó representa uma variável aleatória (que pode ser discreta ou contínua). Estes nós são conectados por arcos

direcionados representando as dependências entre as variáveis do domínio que está sendo modelado. Se um dado arco parte do nó Y e chega ao nó Z , diz-se que Y é pai de Z , e que Z é filho de Y . Quantitativamente, cada nó X_i recebe uma distribuição de probabilidades condicionais $P(X_i|pais(X_i))$ exprimindo a influência dos nós pais (nesta expressão $pais(X_i)$ representa o conjunto dos nós pais do nó X_i). As RB não apresentam ciclos direcionados, ou seja, não é possível passar duas vezes por determinado nó seguindo um caminho que respeite as orientações dos arcos – a Fig. 2 apresenta um grafo cíclico e um acíclico. Devido a isto, é classificada como um grafo direcionado acíclico (ou DAG – *Directed Acyclic Graph*) na teoria dos grafos.

Fig. 2 – Exemplos de grafos direcionados

A seguir será apresentado um exemplo típico de RB, extraído de Russell e Norvig (2003), e que pode ser de grande auxílio para a compreensão da descrição acima. Neste exemplo as variáveis são booleanas.

Considere-se a instalação de um novo sistema de alarme em uma residência. Este sistema é muito confiável para a detecção de ladrões, mas também responde em caso de pequenos terremotos. O dono da casa tem dois vizinhos, João e Maria, que se comprometeram a telefonar caso ouvissem o alarme. João sempre liga quando ouve o alarme, mas às vezes se confunde com o som do telefone da residência e liga também neste caso. Maria gosta de ouvir som alto e às vezes esquece o alarme. Pretende-se, por meio de uma RB, estimar a probabilidade de haver um ladrão na casa, dada a evidência das ligações telefônicas (ou falta delas). Uma RB para este caso está apresentada na Fig. 3.

Observa-se nesta figura a presença das tabelas de probabilidades condicionais (TPC). Cada linha destas tabelas representa a probabilidade relacionada ao nó, dados os estados dos nós pais. Um nó (considerando variáveis

booleanas) com k pais deverá apresentar 2^k linhas em sua tabela de probabilidades condicionais. Um nó que não possua pais – referido como nó raiz – apresenta apenas as probabilidades iniciais relacionadas a cada valor da variável. Ainda em relação à Fig. 3, nota-se que, para este exemplo, são apresentadas apenas as probabilidades relacionadas aos eventos positivos associados ao nó – e.g., probabilidade $P(t)$ de ocorrer terremoto (i.e., não foi apresentada a probabilidade de não ocorrer).

Fig. 3 – Rede bayesiana típica demonstrando a topologia e as TPC

Conforme pode ser observado, a topologia da rede diz muito sobre o assumido em termos de dependência entre as variáveis do problema. Desta topologia, pode-se concluir que tanto o terremoto quanto a entrada de ladrões afetam a probabilidade de o alarme ser acionado. Pode-se verificar que as ligações da Maria ou do João dependem apenas do acionamento do alarme. Desta forma, verifica-se que foi assumido que tanto Maria quanto João não percebem os ladrões diretamente, e que os terremotos são ignorados por eles. Outro ponto importante é que eles não se conferem antes de ligar.

Ao olhar para a proposição do problema e para a rede desenvolvida, algumas objeções poderiam ser feitas. Por exemplo: 1) não apresenta um nó correspondente ao momento em que Maria está ouvindo som alto; 2) não se representou a hipótese de confusão de João com o barulho do telefone; 3) as possíveis falhas no equipamento não foram especificadas (apesar de ter sido mencionada sua alta confiabilidade); 4) não se considerou que Maria ou João poderiam estar de férias, no

supermercado, etc.. Estas indagações são justificadas da seguinte maneira (RUSSELL E NORVIG, 2003): os fatores relacionados aos pontos 1 e 2 foram incluídos nas incertezas associadas aos arcos *Alarme – João Liga* e *Alarme – Maria Liga* porque se tornou difícil encontrar probabilidades específicas para estes casos; já em relação ao ponto 3, estas possibilidades também foram representadas por meio de incremento nas probabilidades condicionais relacionadas ao nó “Alarme”; em relação ao ponto 4, por simplificação, houve também um incremento nas incertezas associadas aos arcos *Alarme – João Liga* e *Alarme – Maria Liga*.

Do parágrafo anterior, conclui-se que as probabilidades tentam sumarizar uma infinita gama de possibilidades para os eventos relacionados. De outra forma, a representação se tornaria muito complexa ou mesmo inviável. Sendo assim, verifica-se que com simplificações é possível enfrentar problemas complexos, pelo menos aproximadamente.

A seguir, apresenta-se uma breve descrição dos conceitos probabilísticos básicos que permitem a representação dos domínios por meio das RB. Primeiramente, serão apresentados os conceitos de probabilidade condicional e de conjunção de probabilidades e, na sequência, as bases para a representação do domínio por meio das RB.

2.2.1.1 Probabilidade condicional

A probabilidade condicional $P(a|b) = c$ se relaciona com a sentença “dado o evento b , a probabilidade de a é c ”, sendo $c = P(a,b)/P(b)$ – sendo $P(b) > 0$. Uma regra fundamental que se extrai da definição de probabilidade condicional é conhecida como regra do produto. Esta propriedade está representada na Eq. (1) para o caso particular de dois eventos a e b .

$$P(a,b) = P(b)P(a|b) \quad (1)$$

Nesta equação, $P(a,b)$ é a probabilidade de ocorrer $a \wedge b$ – i.e., a probabilidade de ocorrência dos eventos a e b . No item 2.2.1.3, esta relação será explorada para demonstrar a plena representação do domínio por meio das RB.

Desta equação pode-se concluir que se os eventos a e b são independentes, então $P(a|b) = P(a)$ e, portanto, $P(a, b) = P(b)P(a)$.

Outra relação que se extrai da definição de probabilidade condicional é a Eq. (2). Da Eq. (1), e lembrando que $P(a, b) = P(b, a)$, conclui-se:

$$P(a|b) = \frac{P(b|a)P(a)}{P(b)} \quad (2)$$

Esta relação é conhecida como regra de Bayes e auxilia na obtenção da probabilidade a partir do surgimento de uma evidência. Ela será explorada no item sobre inferência exata.

2.2.1.2 Conjunção de probabilidades

A conjunção de probabilidades para as variáveis A e B^2 , ou $P(A, B)$, pode ser representada em uma tabela $n \times m$, onde n é o número de estados de A e m o número de estados de B (nas RB cada estado pode ser um evento) – ressalte-se que nada foi mencionado a respeito da dependência entre as variáveis. Como exemplo, considerando 2 estados para a variável A e 3 estados para a variável B , sendo $P(A) = \langle 0,4; 0,6 \rangle$ e $P(B) = \langle 0,4; 0,4; 0,2 \rangle$ possíveis valores para as probabilidades dos estados destas variáveis, tem-se para $P(A, B)$ a Tab. 2.

Tab. 2 – Conjunção de probabilidades das variáveis A e B

Estados de A	Estados de B		
	b_1	b_2	b_3
a_1	$P(a_1, b_1) = 0,16$	$P(a_1, b_2) = 0,12$	$P(a_1, b_3) = 0,12$
a_2	$P(a_2, b_1) = 0,24$	$P(a_2, b_2) = 0,28$	$P(a_2, b_3) = 0,08$

Nesta tabela, cada célula apresenta a probabilidade de uma configuração para a conjunção de probabilidades (as entradas do domínio) – é interessante notar que esta tabela revela a dependência entre as variáveis A e B (e.g. se houvesse independência, $P(a_1, b_3)$ seria igual a 0,08).

² Nesta tese, as letras maiúsculas indicam variáveis e as letras minúsculas indicam eventos (ou estados das variáveis).

Nota-se que para um problema com grande número de variáveis é necessário um número ainda maior de entradas nesta tabela. Sendo assim, torna-se sensível a necessidade de uma representação mais simples para domínios complexos; com grande número de variáveis. A representação por RB pode ser utilizada para suprir esta necessidade.

2.2.1.3 Representação do domínio

As RB promovem a representação completa do domínio, mas de maneira mais enxuta que as tabelas de conjunção de probabilidades. Por meio das relações de dependência condicional entre as variáveis do domínio, é possível determinar a topologia adequada para a RB. Partindo das informações apresentadas nesta rede é possível identificar qualquer entrada do domínio modelado. A seguir está apresentada a obtenção de uma equação por meio da qual este propósito pode ser alcançado. Ademais, está apresentado um exemplo de sua aplicação.

Genericamente, a notação $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é equivalente a $P(X_1 = x_1 \wedge X_2 = x_2 \wedge \dots \wedge X_n = x_n)$ e representa uma dada entrada do domínio – sendo X_i a denominação para uma variável e x_i para um de seus estados. Observando a regra do produto, obtém-se a seguinte equação para esta entrada:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_{n-1}, \dots, x_1)P(x_n|x_{n-1}, \dots, x_1) \quad (3)$$

A reaplicação sistemática da regra do produto gera a identidade apresentada nas Eqs. (4) e (5), conhecida como regra da cadeia.

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_n|x_{n-1}, \dots, x_1)P(x_{n-1}|x_{n-2}, \dots, x_1) \dots P(x_2|x_1)P(x_1) \quad (4)$$

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i|x_{i-1}, \dots, x_1) \quad (5)$$

Para o caso de uma RB, tem-se a Eq. (6), que é válida se for considerada a restrição apresentada na Eq. (7).

$$P(X_i|X_{i-1}, \dots, X_1) = P(X_i|pais(X_i)) \quad (6)$$

$$pais(X_i) \subseteq \{X_{i-1}, \dots, X_1\} \quad (7)$$

A Eq. (6) aponta a independência de cada nó em relação aos seus predecessores, excetuando-se os nós pais. E a Eq. (7) presume que os nós pais foram enumerados antes dos nós filhos (CHARNIAK, 1991).

Os resultados apresentados nas Eqs. (5) e (6) tornam possível a obtenção da Eq. (8).

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | pais(X_i)) \quad (8)$$

Desta forma, cada entrada da conjunção de probabilidade pode ser obtida por meio da multiplicação dos elementos certos, presentes nas tabelas de probabilidades condicionais da rede.

A completa conjunção de probabilidades pode dar qualquer informação a respeito do domínio representado. A RB pode ser utilizada para gerar os dados completos a respeito da conjunção podendo, desta forma, ser utilizada para representar o domínio, sem perda de informação. Como ilustração, pode-se calcular (utilizando o exemplo apresentado na Fig. 3) a probabilidade de o alarme ter tocado, mas sem ter havido terremoto nem presença de ladrão, e João e Maria (ambos) terem ligado. O desenvolvimento do cálculo está apresentado nas Eqs. (9) e (10).

$$P(j, m, a, \neg l, \neg t) = P(j|a)P(m|a)P(a|\neg l, \neg t)P(\neg l)P(\neg t) \quad (9)$$

$$P(j, m, a, \neg l, \neg t) = 0,9 * 0,7 * 0,001 * 0,999 * 0,998 = 0,00062 \quad (10)$$

Para encerrar a discussão sobre a representação do domínio por meio das RB, serão considerados alguns pontos sobre a complexidade da rede e obtenção das TPC e sobre a obtenção de informações partindo da topologia da rede.

2.2.1.4 Complexidade da rede

Assim como as tabelas de conjunção de probabilidades, as redes bayesianas são uma representação completa e não redundante do domínio. No entanto, são uma forma mais compacta de representação porque consideram as restrições no relacionamento entre as variáveis. Esta propriedade faz com que sejam úteis para o

trabalho com domínios de muitas variáveis.

Para exemplificar esta característica pode-se tomar uma rede com 10 nós, com 2 estados cada, na qual 7 nós possuam 3 nós pais e os demais possuam apenas nós filhos (sem dependências condicionais), conforme Fig. 4.

Para este caso são necessários $7 \times 2^3 + 3 = 59$ números para preencher as TPC; já a tabela de conjunção de probabilidades necessitaria de $2^{10} = 1024$ números. A quantidade de dados para povoar uma RB cresce linearmente com a quantidade de nós (mantendo fixa a quantidade de arcos por nó), enquanto na tabela da conjunção de probabilidade esta quantidade cresce exponencialmente.

Fig. 4 – Estrutura da rede exemplo

A complexidade da rede depende do grau de detalhamento requerido. É importante notar que o detalhamento pode trazer dificuldades para encontrar as probabilidades para povoar a rede (preencher as TPC). No exemplo da rede da Fig. 3 podem-se incluir as hipóteses de João ou Maria não ligarem porque no momento em que ouviram o alarme ocorria um terremoto, e consideraram ser este o motivo de acionamento. Neste caso, deveria haver um arco entre os nós “Terremoto” e “João Liga”, e outro entre os nós “Terremoto” e “Maria Liga”, e deveriam ser encontradas probabilidades tais como a de Maria ligar dado que houve terremoto e o alarme foi acionado. O que se deve ponderar é a relação entre os ganhos e os custos (para se obter as informações necessárias) com este detalhamento.

2.2.1.5 Relações de dependência partindo da topologia

Partindo das relações de dependência entre as variáveis de um domínio, é possível determinar a topologia da rede que representa este domínio. Neste ponto é justificado que, partindo de uma rede pronta, também é possível determinar as

condições de dependência entre as variáveis do domínio, dada alguma evidência (ou não). Isto pode ser feito considerando, por exemplo, uma das seguintes assertivas (RUSSELL E NORVIG, 2003):

- Um nó é condicionalmente independente de todos os nós que não são seus descendentes, dados seus nós pais (a Fig. 5 ilustra os subconjuntos formados para uma rede simples);
- Um nó é condicionalmente independente de todos os outros da rede dados seus pais, seus filhos e os pais dos seus filhos – este subconjunto de nós é referido em Pearl (1988) como cobertor de Markov e está ilustrado na Fig. 6 (formado pelos nós internos à zona pontilhada).

Fig. 5 – Dependência do nó A , dados os nós pais

Fig. 6 – Cobertor de Markov para o nó A

Outra maneira para verificar se um nó A é independente de outro nó B é observar o critério da d-separação (PEARL, 1988; CHARNIAK, 1991). Em outras palavras, este critério é utilizado para apontar a independência entre subconjuntos de nós. O nó A é dito d-separado (independente) de B se todo caminho entre A e B se apresentar de alguma das formas apontadas na Fig. 7.

Na Fig. 7, os nós A e B são condicionalmente independentes, dada a evidência E , ou ocorrendo um nó como o D . Desta maneira, E (sendo C um nó pertencente a E) e/ou D bloqueiam o caminho entre A e B . Em resumo, o bloqueio pode ocorrer de três formas:

- O nó C possui um arco de entrada e um de saída no caminho, e há evidência sobre o estado de C ;
- O nó C possui dois arcos de saída no caminho, e há evidência sobre o estado de C ;
- D não pertence a E , e D possui dois arcos de chegada no caminho.

A prova para estas assertivas pode ser encontrada em Pearl (1988).

Fig. 7 – Nós A e B : d-separados

2.2.2 Inferência

Além de representar o domínio de maneira compacta e intuitiva, as RB possibilitam computar as probabilidades posteriores de certas variáveis, dado o conhecimento de certos eventos – i.e., as probabilidades associadas aos estados dos nós da rede depois de encontrada alguma evidência. As variáveis ligadas a estes eventos são classificados como variáveis de evidência. Com este recurso podem ser feitas inferências com três objetivos: 1) *Causas*: dadas as causas obter

as probabilidades dos efeitos; 2) *Diagnósticos*: dados os efeitos, obter as probabilidades das causas; e 3) *Intercausais*: dada a evidência de uma causa, obtém-se a probabilidade de outra causa. Estas possibilidades foram ilustradas na Fig. 8.

Além de consultas a partir de evidências, as RB podem ser utilizadas para (MARQUES E DUTRA, 2006): 1) tomar decisões baseadas em probabilidades; 2) decidir quais evidências adicionais devem ser observadas a fim de se obter informações úteis do sistema; 3) analisar o sistema a fim de buscar os aspectos do modelo que possuam maior impacto sobre as variáveis de consulta; 4) explicar os resultados de uma inferência probabilística a terceiros.

Fig. 8 – Objetivos das inferências

Os algoritmos desenvolvidos para a solução das RB podem ser divididos entre os que trazem solução exata e os que trazem solução aproximada. A seguir, apresenta-se um exemplo de inferência exata, seguido por alguns comentários sobre agrupamento e eliminação de variáveis, e sobre inferência aproximada – ressalte-se que este texto apresenta apenas uma visão geral, como auxílio ao entendimento das aplicações das RB apresentadas ao longo desta tese e que, além disto, esta subseção discute a atualização de uma RB pronta; a próxima seção discute o equacionamento para a combinação e atualização dos dados empregados nos modelos de desempenho humano desenvolvidos nesta tese.

2.2.2.1 Inferência exata

Seja $E = \{E_1, \dots, E_m\}$ o conjunto das variáveis de evidência de determinado domínio, sendo e uma dada evidência, X uma variável qualquer não pertencente a E ,

e $Y = \{Y_1, \dots, Y_l\}$ o conjunto das variáveis que não pertencem às classificações anteriores. Sendo estas variáveis representadas pelos nós de uma RB, uma questão típica seria determinar a distribuição posterior de probabilidade de X , ou seja, determinar $P(X|E)$.

Tome-se como exemplo o caso da rede da Fig. 3. Considere-se que “João Liga” seja verdadeiro e que “Maria Liga” também seja verdadeiro. Neste caso, a probabilidade de haver ladrão na casa é igual a 0,284. As probabilidades condicionais como esta podem ser obtidas pela soma das entradas da conjunção de probabilidades (RUSSELL E NORVIG, 2003). Esta afirmação pode ser justificada partindo-se da regra do produto [vide a Eq. (1)] e levando em consideração todos os possíveis estados para os nós pertencentes a Y . Desta forma, obtêm-se as relações apresentadas nas Eqs. (11) e (12).

$$P(X|E) = \alpha P(X, E) = \alpha \sum_y P(X, E, Y) \quad (11)$$

sendo que:

$$\alpha = \frac{1}{P(E)} \quad (12)$$

O termo $P(X, E, Y)$ pode ser obtido diretamente das tabelas de probabilidades condicionais pela utilização da Eq. (8). Retornando ao exemplo citado, a distribuição de probabilidade da variável *Ladrão*, dada a evidência das ligações, pode ser obtida das Eqs. (13) e (14).

$$P(\text{Ladrão} | \text{João Liga} = \text{verdadeiro}, \text{Maria Liga} = \text{verdadeiro}) = \alpha P(L, j, m) \quad (13)$$

$$\alpha P(L, j, m) = \alpha \sum_t \sum_a P(L, T, A, j, m) \quad (14)$$

Sendo assim, para determinar a probabilidade de haver ladrão na casa, dada a evidência citada, utiliza-se a Eq. (15).

$$P(l|j, m) = \alpha P(l) \sum_t P(T) \sum_a P(A|l, T) P(j|A) P(m|A) \quad (15)$$

A estrutura desta expressão [Eq. (15)] pode ser visualizada na Fig. 9, onde as setas indicam as multiplicações a serem feitas. Os resultados finais de cada caminho devem ser multiplicados por α e somados.

Fig. 9 – Visualização do cálculo

Obtém-se, da maneira indicada, o resultado abaixo.

$$P(l|j, m) = \alpha * 0,00059224 \quad (16)$$

Falta agora a obtenção de α . As Eqs. (17) e (18) cumprem este papel.

$$\alpha = \frac{1}{P(j, m)} \quad (17)$$

$$P(j, m) = \sum_l \sum_t \sum_a P(L)P(T)P(A|L, T)P(j|A)P(m|A) \quad (18)$$

Aplicando os dados do exemplo à Eq. (18) obtêm-se os resultados da Tab. 3.

Tab. 3 – Cálculo de $P(j, m)$

Estado do Sistema	$P(L)$	$P(T)$	$P(A L, T)$	$P(j A)$	$P(m A)$	Total
$P(l, t, a, j, m)$	0,001	0,002	0,950	0,900	0,700	1,197E-06
$P(l, t, \neg a, j, m)$	0,001	0,002	0,050	0,050	0,010	5,000E-11
$P(l, \neg t, a, j, m)$	0,001	0,998	0,940	0,900	0,700	5,910E-04
$P(l, \neg t, \neg a, j, m)$	0,001	0,998	0,060	0,050	0,010	2,994E-08
$P(\neg l, t, a, j, m)$	0,999	0,002	0,290	0,900	0,700	3,650E-04
$P(\neg l, t, \neg a, j, m)$	0,999	0,002	0,710	0,050	0,010	7,093E-07
$P(\neg l, \neg t, a, j, m)$	0,999	0,998	0,001	0,900	0,700	6,281E-04
$P(\neg l, \neg t, \neg a, j, m)$	0,999	0,998	0,999	0,050	0,010	4,980E-04
$P(j, m)$						2,084E-03

Com apoio da Tab. 3, obtêm-se as relações abaixo para α .

$$\alpha = \frac{1}{P(E)} = \frac{1}{P(j, m)} = 479,82 \quad (19)$$

Com o explicitado, obtém-se a distribuição de probabilidade da variável *Ladrão*, dada a evidência de João e Maria terem ligado, apresentada na Eq. (20), que era o objetivo inicial. Nesta equação, o primeiro valor indica a probabilidade de haver ladrão e o segundo, a de não haver.

$$P(L|j, m) = \langle 0,284; 0,716 \rangle \quad (20)$$

A probabilidade de haver ladrão, dadas as evidências citadas no exemplo, pode parecer baixa, mas está atrelada à probabilidade de haver ladrão, sem as evidências. No entanto, o resultado acima comparado com $P(L)$, é um valor 284 vezes maior. Se $P(L)$ fosse 0,003 (três vezes maior que no exemplo), então $P(L|j, m)$ seria 0,544; e para $P(L)$ igual 0,01, então $P(L|j, m)$ seria 0,8. Tudo isto considerando inalteradas as eficiências de João e Maria em perceber o alarme e as demais variáveis.

O procedimento seguido acima é preciso e pode ser utilizado para qualquer rede. No entanto, torna-se extremamente dispendioso para redes com muitos nós e relações de dependência. Para simplificar estes cálculos foram desenvolvidos diversos meios. A seguir serão apresentadas as linhas gerais de três possibilidades de simplificação dos cálculos: 1) eliminação de variáveis; 2) agrupamento de variáveis; 3) métodos aproximados.

2.2.2.2 Eliminação de variáveis

Conforme pode ser observado na Fig. 9, para uma rede simples, existem alguns cálculos que são repetidos. Numa rede maior esta repetição se torna ainda mais onerosa, em termos de custo de processamento e tempo. Desta forma, foram desenvolvidas várias técnicas baseadas no princípio de executar estes cálculos repetitivos uma única vez, memorizando os resultados para consulta posterior. Em

Russell e Norvig (2003) está apresentada a técnica de *eliminação de variáveis*, que é considerada a mais simples deste tipo – ressaltando-se que são eliminadas as variáveis necessárias para a execução dos cálculos e não as da rede analisada.

2.2.2.3 Agrupamento de variáveis

O agrupamento de variáveis é uma técnica amplamente utilizada em muitas ferramentas comerciais que trabalham com RB. Esta técnica consiste em agrupar certas variáveis da rede de forma que se torne uma rede simplesmente conexa.

Uma rede simplesmente conexa é aquela em que existe no máximo um caminho não direcionado (em que não importa a orientação dos arcos) entre um par de nós. Uma rede com múltiplas conexões, em contrapartida, possui pares de nós se conectando por mais de uma combinação de arcos. A Fig. 10 apresenta o exemplo de uma rede com múltiplas conexões simplificada pelo agrupamento de um par de seus nós.

Fig. 10 – Agrupamento de variáveis

Neste exemplo, com uma rede original com variáveis booleanas, o nó gerado pelo agrupamento de outros dois (X e Z) representa uma única variável com quatro estados que são combinações dos estados dos nós originais (são obtidos os estados *vv*, *vf*, *fv*, e *ff*). A obtenção da TPC para o nó gerado (X+Z) se faz pela

combinação das probabilidades dos nós originais. Por exemplo, para o caso do novo estado vv (representando os estados “verdadeiro” para X e “verdadeiro” para Z), multiplica-se $P(X=v|Y=v)$ por $P(Z=v|Y=v)$, ou seja, 0,7 por 0,8. Assim, obtém-se 0,56 para a probabilidade de X e Z serem verdadeiros, dado que Y é verdadeiro.

A vantagem de se fazer inferências exatas utilizando redes simplesmente conexas está no tempo de processamento (linear com a quantidade de nós). No caso do agrupamento, a geração das tabelas de probabilidades condicionais para o nó agrupado também demanda tempo, e que deve ser levado em consideração para a avaliação da complexidade da inferência exata utilizando esta técnica.

2.2.2.4 Inferência aproximada

Dada a impossibilidade de tratamento adequado por meio de inferência exata em redes extensas e com múltiplas conexões, é essencial a consideração de métodos de inferência aproximados (RUSSELL E NORVIG, 2003). Os métodos aproximados utilizam simulação estocástica. Isto significa que para uma determinada rede são gerados resultados aleatórios que são trabalhados estatisticamente e fornecem uma aproximação para a condição desejada. Para melhor compreensão destas ideias, toma-se o exemplo da rede da Fig. 10. Segue-se então o procedimento a seguir:

- Atribui-se um valor aleatório ao nó raiz (Y) da rede – considerando a probabilidade da variável, ou seja, $P(Y)$;
- Dependendo do valor obtido no passo anterior, atribui-se um valor aleatório para as variáveis representadas pelos nós filhos (X e Z) do nó raiz (esta atribuição deve ponderar as probabilidades das TPC que consideram o estado obtido no passo anterior para o nó raiz);
- Os passos anteriores devem ser repetidos considerando que os nós pais passam a ser X e Z , e o nó filho passa a ser W . E as considerações anteriores continuam válidas.

Da Fig. 10, tem-se que $P(Y=v)=0,2$. Assim, se o procedimento acima for repetido n vezes (sendo n um número grande), espera-se que Y seja verdadeiro em 20% das rodadas.

Para a obtenção da probabilidade posterior $P(X=v|Y=v)$, por exemplo, deve-se repetir o procedimento descrito acima n vezes. Então, utilizando o princípio contido na Eq. (1), contabiliza-se o número de vezes que a combinação $(Y=v)U(X=v)$ apareceu. Este resultado deve ser dividido pelo número de vezes que $(Y=v)$ ocorreu independentemente de $(X=v)$. O quociente obtido desta operação tende a se aproximar do valor exato da inferência conforme n aumenta (MARQUES E DUTRA, 2006).

Muito mais poderia ser dito a respeito dos métodos de inferência. No entanto, conforme mencionado anteriormente, o conteúdo apresentado aqui tem o objetivo de ser apenas o essencial para o entendimento dos modelos apresentados nesta tese. Para o trabalho com as redes, neste estudo foi utilizado um programa comercial (NeticaTM 4.08 – ver Norsys Software Corp., 2005) disponibilizado pelo LabRisco-USP.

2.2.3 Modelagem por meio de redes bayesianas

Com as RB é possível sanar os seguintes problemas vivenciados durante a modelagem com métodos convencionais (que trabalham diretamente com a conjunção de probabilidades do domínio):

- Dificuldade de representação dos domínios com muitas variáveis;
- Necessidade de um grande número de probabilidades para a representação de um domínio;
- Probabilidades não intuitivas nas representações convencionais;
- Dificuldade para se fazer inferência partindo das representações convencionais.

Outra vantagem das RB é a possibilidade de trabalhar com redes dinâmicas (*dynamic networks*). A rede dinâmica, por definição, é uma rede que possui nós influenciados por estados anteriores das variáveis do domínio (no instante t alguns nós são influenciados pelos estados de nós no instante $t-1$, $t-2$, $t-3$,...). Como exemplo, tem-se a rede da Fig. 11 que apresenta nós influenciados por outros da mesma rede, mas em tempo distinto (nó M).

Fig. 11 – Exemplo de rede dinâmica

Ainda em relação às redes dinâmicas, existem técnicas para estimar o “limite superior” em RB, ou seja, fazer o tempo tender a infinito, para estimar as probabilidades das variáveis de redes com este tipo de característica (o método de inferência aproximada, apresentado no item 2.2.2.4, é um exemplo do que pode ser feito).

O procedimento geral para a construção de uma RB deve estar de acordo com os passos a seguir (RUSSELL E NORVIG, 2003):

- Escolher o conjunto de variáveis X_i que descrevem o domínio;
- Escolher a ordenação para as variáveis;
- Enquanto existirem variáveis:
 - Selecionar uma variável X_i e adicionar um nó na rede para ela;
 - Definir os $pa_i(X_i)$ como o conjunto mínimo de nós, dentre os já existentes na rede, para as quais a propriedade de dependência condicional se verifique – i.e., o conjunto dos nós cujos estados influenciam nos estados do nó X_i ;
 - Definir a TPC para X_i .

Uma vez que cada nó se liga apenas a nós definidos anteriormente, este método garante que a rede seja acíclica.

2.3 COMBINAÇÃO E ATUALIZAÇÃO BAYESIANA DE DADOS

Esta seção apresenta dois métodos para a combinação e atualização de dados, com o objetivo de definir e atualizar a variabilidade populacional $\phi(p)$ da probabilidade p de interesse. O primeiro método – que representa a abordagem

mais comum (MARTINS, 2013) para o problema – considera que as distribuições de p da população e das subpopulações (a serem combinadas) sejam da mesma família. O segundo método foi desenvolvido para distribuições quaisquer. Nesta seção, será considerada a estimativa da variabilidade populacional da HEP de uma ação qualquer – no Capítulo 4, o segundo método é considerado para estimar a variabilidade populacional dos tipos de erro considerados na aplicação da TECHR. A apresentação de cada método é acompanhada por um exemplo de aplicação e pela geração de uma RB para o mesmo caso.

2.3.1 Primeiro método

No desenvolvimento deste método serão considerados dois tipos de dados: 1) funções densidade de probabilidade representando a variabilidade da HEP em diferentes subpopulações (estratos da população); e 2) eventos observados. Além de que, admite-se que a distribuição da população é da mesma família das distribuições das subpopulações – testes estatísticos podem ser empregados para apontar a distribuição que melhor represente os dados das subpopulações.

O objetivo deste método é determinar os parâmetros mais adequados para a população – variabilidade populacional $\phi(HEP)$ –, em função dos parâmetros θ das subpopulações e evidências E observadas. Este método considera, portanto, a possibilidade de atualização da distribuição da probabilidade $P(\theta)$, i.e., da probabilidade de os parâmetros das subpopulações representarem a variabilidade populacional. Partindo do cálculo da probabilidade de ocorrência de uma HEP, uma evidência e um conjunto determinado de parâmetros, i.e., $P(HEP, E, \theta)$, será determinada a probabilidade do conjunto de parâmetros mais adequados para a população, dada a evidência.

A igualdade na Eq. (21) é obtida por meio da regra da cadeia.

$$P(HEP, E, \theta) = P(E|HEP, \theta)P(HEP|\theta)P(\theta) \quad (21)$$

Para a obtenção de $P(\theta, E)$, faz-se necessário o resultado da Eq. (22), rearranjada na Eq. (23).

$$P(E, \theta) = \sum_{HEP} P(E|HEP, \theta)P(HEP|\theta)P(\theta) \quad (22)$$

$$P(E, \theta) = \left(\sum_{HEP} P(E|HEP, \theta)P(HEP|\theta) \right) P(\theta) \quad (23)$$

A entrada da conjunção de probabilidades apresentada na Eq. (21) pode ser obtida de outra forma, conforme apresentada na Eq. (24).

$$P(HEP, E, \theta) = P(HEP|E, \theta)P(\theta|E)P(E) \quad (24)$$

Neste caso, para a obtenção de $P(\theta, E)$, faz-se necessário o resultado da Eq. (25), rearranjada na Eq. (26).

$$P(E, \theta) = \sum_{HEP} P(HEP|E, \theta)P(\theta|E)P(E) \quad (25)$$

$$P(E, \theta) = \left(\sum_{HEP} P(HEP|E, \theta) \right) P(\theta|E)P(E) \quad (26)$$

O somatório na Eq. (26) pode ser igualado a 1 – isto porque, para θ e E conhecidos, os eventos (estados de HEP) são mutuamente exclusivos.

Igualando as Eqs. (23) e (26), conforme Eq. (27), é possível isolar o fator $P(\theta|E)$, conforme Eq. (28).

$$\left(\sum_{HEP} P(E|HEP, \theta)P(HEP|\theta) \right) P(\theta) = P(\theta|E)P(E) \quad (27)$$

$$P(\theta|E) = \frac{(\sum_{HEP} P(E|HEP, \theta)P(HEP|\theta))P(\theta)}{P(E)} \quad (28)$$

O somatório na Eq. (28) é a função de verossimilhança, $L(E|\theta)$, para o caso discreto (em relação à HEP). Para o caso contínuo, esta função está apresentada na Eq. (29).

$$L(E|\theta) = \int_{HEP} P(E|HEP, \theta)\phi(HEP|\theta)d_{HEP} \quad (29)$$

Na Eq. (29), a função $\phi(HEP|\theta)$ refere-se à distribuição para a variabilidade populacional, i.e., para a incerteza na HEP , conhecido o parâmetro θ .

O fator $P(E)$ pode ser obtido conforme Eq. (30) – onde θ refere-se ao domínio de θ .

$$P(E) = \int_{\theta} \left(\int_{HEP} P(E|HEP, \theta) \phi(HEP|\theta) d_{HEP} \right) P(\theta) d_{\theta} \quad (30)$$

Este primeiro método de atualização pode ser generalizado na Eq. (31). Esta é a forma do Teorema de Bayes empregada neste método para que as probabilidades dos parâmetros [curva $P(\theta)$] sejam atualizadas em função das evidências apresentadas.

$$P(\theta|E) = \frac{\left(\int_{HEP} P(E|HEP, \theta) \phi(HEP|\theta) d_{HEP} \right) P(\theta)}{\int_{\theta} \left(\int_{HEP} P(E|HEP, \theta) \phi(HEP|\theta) d_{HEP} \right) P(\theta) d_{\theta}} \quad (31)$$

2.3.1.1 Exemplo de aplicação do primeiro método

Inicialmente, considerem-se duas subpopulações com funções densidade de probabilidade lognormais. Sendo assim, a distribuição da variabilidade populacional é da mesma família conforme Eq. (32).

$$\phi(HEP) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP - \mu_y)^2 / 2\sigma_y^2} \quad (32)$$

Sendo assim, as subpopulações são determinadas pelos parâmetros $\theta_{\varphi} = (\sigma_{y_{\varphi}}, \mu_{y_{\varphi}})$ das respectivas funções densidade de probabilidade, onde Φ é o conjunto de subpopulações e φ é uma subpopulação qualquer.

Para o exemplo, os parâmetros das subpopulações estão apresentados nas Eqs. (33) e (34).

$$\theta_1 = (\sigma_{y_1}, \mu_{y_1}) = (0,67, -6,91) \quad (33)$$

$$\theta_2 = (\sigma_{y_2}, \mu_{y_2}) = (0,5, -6) \quad (34)$$

As curvas para as subpopulações 1 e 2 estão apresentadas na Fig. 12.

Fig. 12 – Curvas para as Subpopulações 1 e 2

Para que os dados das subpopulações sejam combinados, faz-se necessária a construção de uma função para a representatividade de cada subpopulação na população como um todo.

Como no exemplo não há preponderância de uma ou de outra subpopulação, a distribuição para as probabilidades dos parâmetros das subpopulações representarem os parâmetros da população será considerada uniforme (para m subpopulações, i.e., duas subpopulações), conforme Eq. (35).

$$P(\theta) = \frac{1}{m} = \frac{1}{2} = 50\% \quad (35)$$

A evidência refere-se a uma estimativa para a HEP obtida da observação de k erros em n tentativas na operação do sistema, por exemplo (alternativamente, a estimativa poderia se originar na opinião de especialistas na operação). No exemplo, será empregada a distribuição binomial para expressar a probabilidade das evidências observadas. A Eq. (36) apresenta a distribuição binomial.

$$P(k \text{ erros em } n \mid HEP) = \binom{n}{k} HEP^k (1 - HEP)^{n-k} \quad (36)$$

Sendo $\binom{n}{k} = n!/n!(n-k)!$.

Outras famílias de função poderiam ser escolhidas para ponderar a incerteza na coleta dos dados. No caso do tempo ser um parâmetro importante, por exemplo, poderia ser escolhida a distribuição de Poisson para substituir a binomial na modelagem da probabilidade da evidência dada a HEP. Neste caso, a HEP seria utilizada para compor o parâmetro λ da distribuição de Poisson.

Na Eq. (36), verifica-se independência de θ . Sendo assim, para aplicação da Eq. (31), considera-se $P(E|HEP, \theta)$ igual a $P(E|HEP)$.

Substituindo as Eqs. (32), (35) e (36) na Eq. (31), é obtida a Eq. (37).

$$P(\theta|E) = \frac{\left(\int_0^1 \binom{n}{k} HEP^k (1-HEP)^{n-k} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP - \mu_y)^2 / 2\sigma_y^2} d_{HEP} \right)^{\frac{1}{2}}}{\sum_{\theta} \left(\int_0^1 \binom{n}{k} HEP^k (1-HEP)^{n-k} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP - \mu_y)^2 / 2\sigma_y^2} d_{HEP} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (37)$$

Empregando os dados do exemplo e considerando a evidência de $k=5$ e $n=1000$, a Eq. (37) pode ser reescrita conforme a Eq. (38).

$$P(\theta|E) = \frac{\left(\int_0^1 HEP^5 (1-HEP)^{995} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP - \mu_y)^2 / 2\sigma_y^2} d_{HEP} \right)}{\left(\int_0^1 HEP^5 (1-HEP)^{995} \frac{1}{0,67 \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP + 6,91)^2 / 2,0,67^2} d_{HEP} + \int_0^1 HEP^5 (1-HEP)^{995} \frac{1}{0,5 \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP + 6)^2 / 2,0,5^2} d_{HEP} \right)} \quad (38)$$

As estimativas dos valores numérico das integrais da Eq. (38) foram obtidas pela aplicação da regra trapezoidal, i.e., aplicando a fórmula de Newton-Cotes fechada reproduzida na Eq. (39).

$$\int_a^b f(x) dx \cong (b-a) \frac{f(a) + f(b)}{2} \quad (39)$$

Assim, foram obtidos os resultados apresentados na Eq. (40) para a distribuição da probabilidade dos parâmetros, dada a evidência de 5 erros em 1000 tentativas, equacionada na Eq. (38). Neste processo, os intervalos de integração foram escolhidos de forma a manter $(b-a)$ igual a 10^{-5} – isto porque, em análise de sensibilidade, a redução deste valor não alterou o resultado [considerando o número de dígitos apresentado na Eq. (40)].

$$[P(\theta_1|k = 5, n = 1000); P(\theta_2|k = 5, n = 1000)] = [19,03\%; 80,97\%] \quad (40)$$

2.3.1.2 Rede bayesiana para o exemplo de aplicação do primeiro método

O interesse no desenvolvimento da RB é verificar o comportamento da distribuição a priori para a probabilidade dos parâmetros frente às evidências.

Para o preenchimento das TPC, considera-se que a população e as subpopulações apresentam distribuição da mesma família. Para o exemplo, a distribuição é lognormal.

Os nós modelados na RB são discretos, de forma que as variáveis contínuas foram modeladas em estados definidos; em quantidade limitada. Esta abordagem resultou em estimativas para as probabilidades ligeiramente diferentes das obtidas no item anterior.

Os nós presentes nesta rede são os seguintes: 1) “Parametro”; 2) “Populacao”; 3) “Evidencia”; e 4) “Campo”.

O nó “Parametro” traz as probabilidades dos conjuntos de parâmetros serem o conjunto de parâmetros da população, i.e., $P(\theta)$. Cada conjunto de parâmetros refere-se aos parâmetros da distribuição de uma subpopulação. Sendo assim, os estados para este nó são os conjuntos de parâmetros das subpopulações 1 e 2, identificados por *Parametro1* e *Parametro2*, respectivamente – conforme identificadas nas Eqs. (33) e (34). A TPC para este nó está apresentada na Tab. 4. Os dados para o preenchimento desta TPC foram extraídos da distribuição apresentada na Eq. (35).

Tab. 4 – TPC para o nó “Parametro”

<i>Parametro1</i>	<i>Parametro2</i>
0,5	0,5

O nó “Populacao” representa a variabilidade populacional para a HEP, $\phi(HEP)$. Este nó é dependente do nó “Parametro”. Para o exemplo, estão sendo considerados 21 estados, com valores entre 0 e 10^{-2} (esta discretização foi realizada tendo em vista as características do problema modelado pela RB; as HEP deste intervalo apresentam mais de 99,99% de probabilidade de ocorrência, dentre as

HEP de cada subpopulação). Cada estado representa um intervalo. Os estados e os intervalos foram associados na TPC para este nó conforme a Tab. 5.

Tab. 5 – TPC para o nó “Populacao”

<i>Estado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Parametro1</i>	<i>Parametro2</i>
HEP000	(0,00000;0,00000)	0,00E+00	0,00E+00
HEP005	(0,00000;0,00075)	3,46E-01	4,75E-03
HEP010	(0,00075;0,00125)	2,95E-01	7,70E-02
HEP015	(0,00125;0,00175)	1,63E-01	1,61E-01
HEP020	(0,00175;0,00225)	8,60E-02	1,82E-01
HEP025	(0,00225;0,00275)	4,61E-02	1,60E-01
HEP030	(0,00275;0,00325)	2,55E-02	1,24E-01
HEP035	(0,00325;0,00375)	1,46E-02	9,01E-02
HEP040	(0,00375;0,00425)	8,61E-03	6,32E-02
HEP045	(0,00425;0,00475)	5,23E-03	4,36E-02
HEP050	(0,00475;0,00525)	3,27E-03	2,99E-02
HEP055	(0,00525;0,00575)	2,09E-03	2,04E-02
HEP060	(0,00575;0,00625)	1,36E-03	1,40E-02
HEP065	(0,00625;0,00675)	9,07E-04	9,59E-03
HEP070	(0,00675;0,00725)	6,14E-04	6,62E-03
HEP075	(0,00725;0,00775)	4,23E-04	4,59E-03
HEP080	(0,00775;0,00825)	2,95E-04	3,21E-03
HEP085	(0,00825;0,00875)	2,09E-04	2,26E-03
HEP090	(0,00875;0,00925)	1,50E-04	1,60E-03
HEP095	(0,00925;0,00975)	1,08E-04	1,14E-03
HEP100	(0,00975;0,01000)	7,94E-05	8,17E-04

A TPC reproduzida na Tab. 5 foi preenchida de acordo com a Eq. (41), sendo a integração realizada no intervalo indicado na segunda coluna.

$$P(HEP|\theta) = \int_{Intervalo} Lognormal(\theta) \quad (41)$$

Mais especificamente, considerando os possíveis estados para o nó “Parametro”, a TPC foi preenchida com base nas Eqs. (42) e (43).

$$P(HEP|\theta_1) = \int_{Intervalo} Lognormal(\theta_1) = \int_{Intervalo} Lognormal(0,67; -6,91) \quad (42)$$

$$P(HEP|\theta_2) = \int_{Intervalo} Lognormal(\theta_2) = \int_{Intervalo} Lognormal(0,5; -6) \quad (43)$$

O nó “Evidencia” foi introduzido na RB para permitir a atualização do modelo mediante a observação de k ocorrências de erro em n tentativas na operação do sistema (este nó também pode ser utilizado para inserir a opinião de especialistas sobre o comportamento do sistema, componente ou elemento humano modelado), como pode ser visto na subseção 4.2.1. Para este nó foram considerados 22 estados, associando valores para k conforme a primeira coluna da Tab. 6.

Tab. 6 – TPC para o nó “Evidencia”

Estado	HEP000	HEP005	HEP010	HEP015	HEP020	HEP025	HEP030	HEP035	HEP040	HEP045	HEP050
e0 (k=0)	1,00E+00	6,06E-01	3,68E-01	2,23E-01	1,35E-01	8,18E-02	4,96E-02	3,00E-02	1,82E-02	1,10E-02	6,65E-03
e1 (k=1)	0,00E+00	3,03E-01	3,68E-01	3,35E-01	2,71E-01	2,05E-01	1,49E-01	1,05E-01	7,30E-02	4,97E-02	3,34E-02
e2 (k=2)	0,00E+00	7,58E-02	1,84E-01	2,51E-01	2,71E-01	2,57E-01	2,24E-01	1,85E-01	1,46E-01	1,12E-01	8,39E-02
e3 (k=3)	0,00E+00	1,26E-02	6,13E-02	1,26E-01	1,81E-01	2,14E-01	2,24E-01	2,16E-01	1,96E-01	1,69E-01	1,40E-01
e4 (k=4)	0,00E+00	1,57E-03	1,53E-02	4,70E-02	9,02E-02	1,34E-01	1,68E-01	1,89E-01	1,96E-01	1,90E-01	1,76E-01
e5 (k=5)	0,00E+00	1,57E-04	3,05E-03	1,41E-02	3,60E-02	6,68E-02	1,01E-01	1,32E-01	1,57E-01	1,71E-01	1,76E-01
e6 (k=6)	0,00E+00	1,30E-05	5,06E-04	3,50E-03	1,20E-02	2,77E-02	5,03E-02	7,71E-02	1,04E-01	1,28E-01	1,47E-01
e7 (k=7)	0,00E+00	9,24E-07	7,19E-05	7,48E-04	3,41E-03	9,87E-03	2,15E-02	3,84E-02	5,95E-02	8,24E-02	1,05E-01
e8 (k=8)	0,00E+00	5,74E-08	8,94E-06	1,39E-04	8,47E-04	3,07E-03	8,03E-03	1,68E-02	2,97E-02	4,62E-02	6,52E-02
e9 (k=9)	0,00E+00	3,16E-09	9,86E-07	2,31E-05	1,87E-04	8,49E-04	2,66E-03	6,49E-03	1,31E-02	2,30E-02	3,61E-02
e10 (k=10)	0,00E+00	1,57E-10	9,78E-08	3,44E-06	3,72E-05	2,11E-04	7,94E-04	2,26E-03	5,22E-03	1,03E-02	1,80E-02
e11 (k=11)	0,00E+00	7,06E-12	8,81E-09	4,65E-07	6,70E-06	4,75E-05	2,15E-04	7,14E-04	1,89E-03	4,20E-03	8,14E-03
e12 (k=12)	0,00E+00	2,91E-13	7,27E-10	5,75E-08	1,11E-06	9,82E-06	5,34E-05	2,07E-04	6,25E-04	1,56E-03	3,37E-03
e13 (k=13)	0,00E+00	1,11E-14	5,53E-11	6,57E-09	1,69E-07	1,87E-06	1,22E-05	5,52E-05	1,91E-04	5,37E-04	1,29E-03
e14 (k=14)	0,00E+00	3,90E-16	3,90E-12	6,96E-10	2,38E-08	3,31E-07	2,59E-06	1,37E-05	5,40E-05	1,71E-04	4,56E-04
e15 (k=15)	0,00E+00	1,28E-17	2,57E-13	6,87E-11	3,14E-09	5,44E-08	5,12E-07	3,15E-06	1,43E-05	5,09E-05	1,51E-04
e16 (k=16)	0,00E+00	3,95E-19	1,58E-14	6,35E-12	3,87E-10	8,40E-09	9,48E-08	6,82E-07	3,52E-06	1,42E-05	4,66E-05
e17 (k=17)	0,00E+00	1,14E-20	9,17E-16	5,52E-13	4,49E-11	1,22E-09	1,65E-08	1,39E-07	8,19E-07	3,70E-06	1,36E-05
e18 (k=18)	0,00E+00	3,13E-22	5,01E-17	4,53E-14	4,92E-12	1,67E-10	2,71E-09	2,66E-08	1,80E-07	9,14E-07	3,72E-06
e19 (k=19)	0,00E+00	8,08E-24	2,59E-18	3,52E-15	5,09E-13	2,16E-11	4,22E-10	4,83E-09	3,73E-08	2,14E-07	9,66E-07
e20 (k=20)	0,00E+00	1,98E-25	1,27E-19	2,59E-16	5,00E-14	2,66E-12	6,23E-11	8,32E-10	7,35E-09	4,74E-08	2,38E-07
e>20 (k>20)	0,00E+00	4,74E-27	6,23E-21	1,95E-17	5,14E-15	3,49E-13	1,01E-11	1,61E-10	1,67E-09	1,25E-08	7,17E-08

Tab. 6 – TPC para o nó “Evidencia” (Continuação)

Estado	HEP055	HEP060	HEP065	HEP070	HEP075	HEP080	HEP085	HEP090	HEP095	HEP100
e0	4,03E-03	2,43E-03	1,47E-03	8,90E-04	5,38E-04	3,25E-04	1,96E-04	1,18E-04	7,15E-05	4,32E-05
e1	2,23E-02	1,47E-02	9,63E-03	6,27E-03	4,06E-03	2,62E-03	1,68E-03	1,08E-03	6,86E-04	4,36E-04
e2	6,15E-02	4,43E-02	3,15E-02	2,21E-02	1,53E-02	1,06E-02	7,20E-03	4,88E-03	3,29E-03	2,20E-03
e3	1,13E-01	8,90E-02	6,85E-02	5,18E-02	3,86E-02	2,83E-02	2,05E-02	1,47E-02	1,05E-02	7,39E-03
e4	1,56E-01	1,34E-01	1,12E-01	9,10E-02	7,26E-02	5,69E-02	4,39E-02	3,34E-02	2,51E-02	1,86E-02
e5	1,72E-01	1,61E-01	1,46E-01	1,28E-01	1,09E-01	9,14E-02	7,50E-02	6,04E-02	4,79E-02	3,75E-02
e6	1,58E-01	1,61E-01	1,58E-01	1,49E-01	1,37E-01	1,22E-01	1,07E-01	9,10E-02	7,62E-02	6,27E-02
e7	1,24E-01	1,38E-01	1,47E-01	1,50E-01	1,47E-01	1,40E-01	1,30E-01	1,17E-01	1,04E-01	9,00E-02
e8	8,49E-02	1,03E-01	1,19E-01	1,31E-01	1,38E-01	1,40E-01	1,38E-01	1,32E-01	1,24E-01	1,13E-01
e9	5,18E-02	6,88E-02	8,59E-02	1,02E-01	1,15E-01	1,25E-01	1,30E-01	1,32E-01	1,31E-01	1,26E-01
e10	2,84E-02	4,12E-02	5,57E-02	7,10E-02	8,60E-02	9,96E-02	1,11E-01	1,19E-01	1,24E-01	1,26E-01
e11	1,41E-02	2,24E-02	3,28E-02	4,51E-02	5,85E-02	7,23E-02	8,55E-02	9,74E-02	1,07E-01	1,14E-01
e12	6,44E-03	1,11E-02	1,77E-02	2,62E-02	3,64E-02	4,80E-02	6,04E-02	7,29E-02	8,47E-02	9,52E-02
e13	2,71E-03	5,11E-03	8,80E-03	1,40E-02	2,09E-02	2,94E-02	3,94E-02	5,03E-02	6,17E-02	7,31E-02
e14	1,06E-03	2,17E-03	4,06E-03	6,97E-03	1,11E-02	1,67E-02	2,38E-02	3,22E-02	4,17E-02	5,20E-02
e15	3,84E-04	8,62E-04	1,74E-03	3,23E-03	5,54E-03	8,87E-03	1,34E-02	1,92E-02	2,63E-02	3,45E-02
e16	1,31E-04	3,20E-04	7,03E-04	1,40E-03	2,58E-03	4,40E-03	7,08E-03	1,07E-02	1,55E-02	2,15E-02
e17	4,18E-05	1,12E-04	2,66E-04	5,72E-04	1,13E-03	2,06E-03	3,51E-03	5,65E-03	8,63E-03	1,26E-02
e18	1,26E-05	3,69E-05	9,51E-05	2,20E-04	4,65E-04	9,06E-04	1,64E-03	2,80E-03	4,52E-03	6,93E-03
e19	3,61E-06	1,15E-05	3,22E-05	8,02E-05	1,82E-04	3,77E-04	7,28E-04	1,32E-03	2,24E-03	3,62E-03
e20	9,79E-07	3,41E-06	1,03E-05	2,77E-05	6,73E-05	1,49E-04	3,06E-04	5,86E-04	1,05E-03	1,79E-03
e>20	3,33E-07	1,30E-06	4,41E-06	1,32E-05	3,53E-05	8,63E-05	1,94E-04	4,07E-04	7,99E-04	1,48E-03

O nó “Evidencia” é dependente dos nós “Populacao” e “Campo”. A TPC para o nó “Evidencia” foi preenchida considerando uma distribuição binomial para a evidência. Considerando os possíveis estados para o nó “População”, a TPC foi preenchida com base na Eq. (44).

$$P(E|HEP, n) = \text{Binomial}(E, HEP, n) = \binom{n}{k} HEP^k (1 - HEP)^{n-k} \quad (44)$$

Na Eq. (44), E representa os estados do nó “Evidencia”, conforme apresentados na primeira coluna da Tab. 6. O último estado, “e>20”, apresenta a

probabilidade de ocorrência de k maior que 20, i.e., $P(k > 20) = \sum_{k=21}^n P(E = k)$, dados os estados dos nós pais (HEP e n conhecidos).

O número n de tentativas é inserido no nó “Campo”, que é determinístico. Este nó refere-se à quantidade de oportunidades para ocorrência do erro humano. Para o exercício, n é igual a 1000.

A topologia para a RB modelando o exemplo de aplicação está apresentada na Fig. 13.

Fig. 13 – Rede bayesiana para o exemplo do primeiro método

Para esta RB (apresentada na Fig. 13), foi considerada a evidência de 5 erros ($k=5$, ocorrência do estado “e5” do nó “Evidencia”) em 1000 oportunidades, sendo obtidos os resultados apresentados na Fig. 14.

Verificam-se, na Fig. 14, os valores atualizados para as probabilidades dos estados do nó “Parametro”. Foram obtidos os resultados apresentados na Eq. (45) para a distribuição da probabilidade dos parâmetros, dada a evidência de 5 erros em 1000 tentativas.

$$[P(\theta_1|k = 5, n = 1000); P(\theta_2|k = 5, n = 1000)] = [18,8\% ; 81,2\%] \quad (45)$$

Estes resultados apresentam desvio em relação ao esperado – expresso na Eq. (40). Este desvio é atribuído às simplificações para permitir a discretização do problema – enquanto para a obtenção do resultado na Eq. (40) foi empregado $(b - a)$ igual a 10^{-5} [vide a Eq. (39)], sendo a Eq. (38) integrada entre 0 e 1, para o resultado na Eq. (45) empregou-se $5 \cdot 10^{-4}$, sendo considerados valores entre 0 e 10^{-2} . (vide a Tab. 5).

Fig. 14 – RB da Fig. 13 atualizada

Ainda na Fig. 14, pode ser observada no nó “Populacao” a atualização da variabilidade populacional, elevando o valor esperado da HEP de 2,02E-3 (ver Fig. 13) para 3,52E-3. A distribuição para a variabilidade populacional inicial para a HEP foi projetada na Fig. 15. Além das curvas para as subpopulações, a curva para a variabilidade populacional posterior à atualização também foi projetada nesta figura.

Combinação e Atualização

Fig. 15 – Curvas para a variabilidade populacional e subpopulações

2.3.2 Segundo método

Neste método não é necessário assumir que as subpopulações são da mesma família da população. Isto permite a combinação de dados apresentados em diversas distribuições, mesmo distribuições contínuas combinadas com distribuições discretas. Assim, não serão considerados os parâmetros θ das distribuições das subpopulações φ , mas sim a probabilidade $P(\varphi)$ de cada subpopulação representar a população. Desta forma, a variabilidade da subpopulação é considerada uma possibilidade para a variabilidade da população. Sendo assim, $P(\varphi)$ será atualizada em função das evidências, sendo obtida $P(\varphi|E)$. Desta forma, será estimada uma distribuição para a HEP da população, dadas evidências de subpopulações, com base na probabilidade de cada subpopulação φ representar a população.

Neste contexto, aplicando os mesmos conceitos utilizados para a obtenção da Eq. (31), foi obtida a Eq. (46). Esta equação é a forma generalizada do Teorema de Bayes que será empregada no segundo método, para obter $P(\varphi|E)$.

$$P(\varphi|E) = \frac{\left(\int_{HEP} P(E|HEP, \varphi) \phi_{\varphi}(HEP) d_{HEP} \right) P(\varphi)}{\int_{\Phi} \left(\int_{HEP} P(E|HEP, \Phi) \phi_{\Phi}(HEP) d_{HEP} \right) P(\Phi) d_{\Phi}} \quad (46)$$

Na Eq. (46), $P(E|HEP, \varphi)$ refere-se à probabilidade da evidência E , dada uma HEP específica e que a subpopulação φ representa a população. Além disto, $\phi_\varphi(HEP)$ refere-se à distribuição da HEP na subpopulação φ . Para a obtenção da variabilidade populacional esperada será empregada a Eq. (47) – sendo Φ o conjunto de subpopulações.

$$\phi(HEP) = \sum_{\varphi} \phi_\varphi(HEP) P(\varphi) \quad (47)$$

2.3.2.1 Exemplo de aplicação do segundo método

O exemplo de aplicação do segundo método é o mesmo que o apresentado para o primeiro. Esta escolha permite a comparação dos dois métodos de atualização. Sendo assim, foram consideradas as variabilidades das HEP de duas subpopulações, 1 e 2, conforme apresentadas nas Eqs. (32), (33) e (34). Estas curvas foram apresentadas na Fig. 12.

Para a evidência, como no exemplo de aplicação do primeiro método, pode ser utilizada a Eq. (36), considerando a evidência de $k=5$ e $n=1000$.

Como não há preponderância entre uma ou outra subpopulação, a distribuição a priori para as probabilidades das subpopulações representarem a população será considerada uniforme, conforme a Eq. (48).

$$P(\varphi) = \frac{1}{m} = \frac{1}{2} = 50\% \quad (48)$$

Nesta equação, m representa o número de subpopulações consideradas.

Substituindo as Eqs. (32), (48) e (36) na Eq. (46), é obtida a Eq. (49).

$$P(\varphi|E) = \frac{\left(\int_0^1 \binom{n}{k} HEP^k (1 - HEP)^{n-k} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP - \mu_y)^2 / 2\sigma_y^2} d_{HEP} \right)^{\frac{1}{2}}}{\sum_{\varphi} \left(\int_0^1 \binom{n}{k} HEP^k (1 - HEP)^{n-k} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi} HEP} e^{-(\ln HEP - \mu_y)^2 / 2\sigma_y^2} d_{HEP} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (49)$$

A solução para a Eq. (49) é idêntica à solução para a Eq. (37), já que k e n também são idênticos.

2.3.2.2 Rede bayesiana para o exemplo de aplicação do segundo método

O interesse no desenvolvimento desta rede bayesiana é verificar o comportamento da distribuição a priori para a probabilidade de cada subpopulação representar a população frente às evidências. Diferentemente do primeiro método, neste caso, para o preenchimento das TPC, não importa a distribuição das subpopulações. Ademais, os nós modelados na RB são discretos, de forma que as variáveis contínuas foram modeladas em estados definidos; em quantidade limitada. Esta abordagem resultou em estimativas para as probabilidades ligeiramente diferentes das obtidas no item anterior.

Os nós presentes nesta rede são os seguintes: 1) Nós para as distribuições das subpopulações: “Subpopulação 1” e “Subpopulação 2”; 2) “Evidência”; 3) “Campo”; 4) “Peso”; e 5) “População”.

Os nós para as distribuições das subpopulações trazem os dados disponíveis sobre a variabilidade da HEP nas subpopulações. Para esta rede, serão considerados dois nós, “Subpopulação 1” e “Subpopulação 2”, apresentando distribuições lognormais, com parâmetros apresentados respectivamente nas Eqs. (33) e (34). Para o exemplo, estão sendo considerados 21 estados, com valores entre 0 e 10^{-2} (esta discretização foi realizada tendo em vista as características do problema modelado pela RB; as HEP deste intervalo apresentam mais de 99,99% de probabilidade de ocorrência, dentre as HEP de cada subpopulação). Cada estado representa um intervalo. Os estados e os intervalos foram associados na TPC para os nós conforme a Tab. 7 (por simplicidade, as TPC estão apresentadas na mesma tabela).

As TPC reproduzidas na Tab. 7 foram preenchidas de acordo com as Eqs. (50) e (51), sendo a integração realizada no intervalo indicado na segunda coluna.

$$P_{\text{SUB1}}(\text{HEP}) = \int_{\text{Intervalo}} \text{Lognormal}(0,67; -6,91) \quad (50)$$

$$P_{\text{SUB2}}(\text{HEP}) = \int_{\text{Intervalo}} \text{Lognormal}(0,5; -6) \quad (51)$$

O nó “Evidência” tem a mesma função do nó homônimo apresentado para a RB no exemplo do primeiro método, apresentando os mesmos estados daquele

exemplo. Seu preenchimento, no entanto, considera a dependência dos nós “Subpopulação 1”, “Subpopulação 2”, “Campo” e “Peso”. Isto gerou 19.404 entradas para a TPC. Para sua reprodução, seriam necessárias aproximadamente 40 tabelas semelhantes à Tab. 6. Desta forma, será apresentada apenas uma parte desta TPC, considerando um estado para os nós “Subpopulação 2” (“HEP000”, i.e., HEP=0, ver Tab. 7), “Campo” (este nó é determinístico: vide a explicação adiante) e “Peso” (“Subpopulação 1”: vide a explicação adiante), e variando os estados do nó “Subpopulação 1”. A Tab. 8 reproduz esta parte da TPC.

Tab. 7 – TPC para os nós “Subpopulação 1” e “Subpopulação 2”

<i>Estado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Subpopulação 1</i>	<i>Subpopulação 2</i>
<i>HEP000</i>	<i>(0,00000;0,00000)</i>	0,00E+00	0,00E+00
<i>HEP005</i>	<i>(0,00000;0,00075)</i>	3,46E-01	4,75E-03
<i>HEP010</i>	<i>(0,00075;0,00125)</i>	2,95E-01	7,70E-02
<i>HEP015</i>	<i>(0,00125;0,00175)</i>	1,63E-01	1,61E-01
<i>HEP020</i>	<i>(0,00175;0,00225)</i>	8,60E-02	1,82E-01
<i>HEP025</i>	<i>(0,00225;0,00275)</i>	4,61E-02	1,60E-01
<i>HEP030</i>	<i>(0,00275;0,00325)</i>	2,55E-02	1,24E-01
<i>HEP035</i>	<i>(0,00325;0,00375)</i>	1,46E-02	9,01E-02
<i>HEP040</i>	<i>(0,00375;0,00425)</i>	8,61E-03	6,32E-02
<i>HEP045</i>	<i>(0,00425;0,00475)</i>	5,23E-03	4,36E-02
<i>HEP050</i>	<i>(0,00475;0,00525)</i>	3,27E-03	2,99E-02
<i>HEP055</i>	<i>(0,00525;0,00575)</i>	2,09E-03	2,04E-02
<i>HEP060</i>	<i>(0,00575;0,00625)</i>	1,36E-03	1,40E-02
<i>HEP065</i>	<i>(0,00625;0,00675)</i>	9,07E-04	9,59E-03
<i>HEP070</i>	<i>(0,00675;0,00725)</i>	6,14E-04	6,62E-03
<i>HEP075</i>	<i>(0,00725;0,00775)</i>	4,23E-04	4,59E-03
<i>HEP080</i>	<i>(0,00775;0,00825)</i>	2,95E-04	3,21E-03
<i>HEP085</i>	<i>(0,00825;0,00875)</i>	2,09E-04	2,26E-03
<i>HEP090</i>	<i>(0,00875;0,00925)</i>	1,50E-04	1,60E-03
<i>HEP095</i>	<i>(0,00925;0,00975)</i>	1,08E-04	1,14E-03
<i>HEP100</i>	<i>(0,00975;0,01000)</i>	7,94E-05	8,17E-04

Tab. 8 – TPC para o nó “Evidência”

<i>Estado</i>	<i>HEP000</i>	<i>HEP005</i>	<i>HEP010</i>	<i>HEP015</i>	<i>HEP020</i>	<i>HEP025</i>	<i>HEP030</i>	<i>HEP035</i>	<i>HEP040</i>	<i>HEP045</i>	<i>HEP050</i>
<i>e0</i>	1,00E+00	6,06E-01	3,68E-01	2,23E-01	1,35E-01	8,18E-02	4,96E-02	3,00E-02	1,82E-02	1,10E-02	6,65E-03
<i>e1</i>	0,00E+00	3,03E-01	3,68E-01	3,35E-01	2,71E-01	2,05E-01	1,49E-01	1,05E-01	7,30E-02	4,97E-02	3,34E-02
<i>e2</i>	0,00E+00	7,58E-02	1,84E-01	2,51E-01	2,71E-01	2,57E-01	2,24E-01	1,85E-01	1,46E-01	1,12E-01	8,39E-02
<i>e3</i>	0,00E+00	1,26E-02	6,13E-02	1,26E-01	1,81E-01	2,14E-01	2,24E-01	2,16E-01	1,96E-01	1,69E-01	1,40E-01
<i>e4</i>	0,00E+00	1,57E-03	1,53E-02	4,70E-02	9,02E-02	1,34E-01	1,68E-01	1,89E-01	1,96E-01	1,90E-01	1,76E-01
<i>e5</i>	0,00E+00	1,57E-04	3,05E-03	1,41E-02	3,60E-02	6,68E-02	1,01E-01	1,32E-01	1,57E-01	1,71E-01	1,76E-01
<i>e6</i>	0,00E+00	1,30E-05	5,06E-04	3,50E-03	1,20E-02	2,77E-02	5,03E-02	7,71E-02	1,04E-01	1,28E-01	1,47E-01
<i>e7</i>	0,00E+00	9,24E-07	7,19E-05	7,48E-04	3,41E-03	9,87E-03	2,15E-02	3,84E-02	5,95E-02	8,24E-02	1,05E-01
<i>e8</i>	0,00E+00	5,74E-08	8,94E-06	1,39E-04	8,47E-04	3,07E-03	8,03E-03	1,68E-02	2,97E-02	4,62E-02	6,52E-02
<i>e9</i>	0,00E+00	3,16E-09	9,86E-07	2,31E-05	1,87E-04	8,49E-04	2,66E-03	6,49E-03	1,31E-02	2,30E-02	3,61E-02
<i>e10</i>	0,00E+00	1,57E-10	9,78E-08	3,44E-06	3,72E-05	2,11E-04	7,94E-04	2,26E-03	5,22E-03	1,03E-02	1,80E-02
<i>e11</i>	0,00E+00	7,06E-12	8,81E-09	4,65E-07	6,70E-06	4,75E-05	2,15E-04	7,14E-04	1,89E-03	4,20E-03	8,14E-03
<i>e12</i>	0,00E+00	2,91E-13	7,27E-10	5,75E-08	1,11E-06	9,82E-06	5,34E-05	2,07E-04	6,25E-04	1,56E-03	3,37E-03
<i>e13</i>	0,00E+00	1,11E-14	5,53E-11	6,57E-09	1,69E-07	1,87E-06	1,22E-05	5,52E-05	1,91E-04	5,37E-04	1,29E-03
<i>e14</i>	0,00E+00	3,90E-16	3,90E-12	6,96E-10	2,38E-08	3,31E-07	2,59E-06	1,37E-05	5,40E-05	1,71E-04	4,56E-04
<i>e15</i>	0,00E+00	1,28E-17	2,57E-13	6,87E-11	3,14E-09	5,44E-08	5,12E-07	3,15E-06	1,43E-05	5,09E-05	1,51E-04
<i>e16</i>	0,00E+00	3,95E-19	1,58E-14	6,35E-12	3,87E-10	8,40E-09	9,48E-08	6,82E-07	3,52E-06	1,42E-05	4,66E-05
<i>e17</i>	0,00E+00	1,14E-20	9,17E-16	5,52E-13	4,49E-11	1,22E-09	1,65E-08	1,39E-07	8,19E-07	3,70E-06	1,36E-05
<i>e18</i>	0,00E+00	3,13E-22	5,01E-17	4,53E-14	4,92E-12	1,67E-10	2,71E-09	2,66E-08	1,80E-07	9,14E-07	3,72E-06
<i>e19</i>	0,00E+00	8,08E-24	2,59E-18	3,52E-15	5,09E-13	2,16E-11	4,22E-10	4,83E-09	3,73E-08	2,14E-07	9,66E-07
<i>e20</i>	0,00E+00	1,98E-25	1,27E-19	2,59E-16	5,00E-14	2,66E-12	6,23E-11	8,32E-10	7,35E-09	4,74E-08	2,38E-07
<i>e>20</i>	0,00E+00	4,74E-27	6,23E-21	1,95E-17	5,14E-15	3,49E-13	1,01E-11	1,61E-10	1,67E-09	1,25E-08	7,17E-08

Tab. 8 – TPC para o nó “Evidência” (Continuação)

Estado	HEP055	HEP060	HEP065	HEP070	HEP075	HEP080	HEP085	HEP090	HEP095	HEP100
e0	4,03E-03	2,43E-03	1,47E-03	8,90E-04	5,38E-04	3,25E-04	1,96E-04	1,18E-04	7,15E-05	4,32E-05
e1	2,23E-02	1,47E-02	9,63E-03	6,27E-03	4,06E-03	2,62E-03	1,68E-03	1,08E-03	6,86E-04	4,36E-04
e2	6,15E-02	4,43E-02	3,15E-02	2,21E-02	1,53E-02	1,06E-02	7,20E-03	4,88E-03	3,29E-03	2,20E-03
e3	1,13E-01	8,90E-02	6,85E-02	5,18E-02	3,86E-02	2,83E-02	2,05E-02	1,47E-02	1,05E-02	7,39E-03
e4	1,56E-01	1,34E-01	1,12E-01	9,10E-02	7,26E-02	5,69E-02	4,39E-02	3,34E-02	2,51E-02	1,86E-02
e5	1,72E-01	1,61E-01	1,46E-01	1,28E-01	1,09E-01	9,14E-02	7,50E-02	6,04E-02	4,79E-02	3,75E-02
e6	1,58E-01	1,61E-01	1,58E-01	1,49E-01	1,37E-01	1,22E-01	1,07E-01	9,10E-02	7,62E-02	6,27E-02
e7	1,24E-01	1,38E-01	1,47E-01	1,50E-01	1,47E-01	1,40E-01	1,30E-01	1,17E-01	1,04E-01	9,00E-02
e8	8,49E-02	1,03E-01	1,19E-01	1,31E-01	1,38E-01	1,40E-01	1,38E-01	1,32E-01	1,24E-01	1,13E-01
e9	5,18E-02	6,88E-02	8,59E-02	1,02E-01	1,15E-01	1,25E-01	1,30E-01	1,32E-01	1,31E-01	1,26E-01
e10	2,84E-02	4,12E-02	5,57E-02	7,10E-02	8,60E-02	9,96E-02	1,11E-01	1,19E-01	1,24E-01	1,26E-01
e11	1,41E-02	2,24E-02	3,28E-02	4,51E-02	5,85E-02	7,23E-02	8,55E-02	9,74E-02	1,07E-01	1,14E-01
e12	6,44E-03	1,11E-02	1,77E-02	2,62E-02	3,64E-02	4,80E-02	6,04E-02	7,29E-02	8,47E-02	9,52E-02
e13	2,71E-03	5,11E-03	8,80E-03	1,40E-02	2,09E-02	2,94E-02	3,94E-02	5,03E-02	6,17E-02	7,31E-02
e14	1,06E-03	2,17E-03	4,06E-03	6,97E-03	1,11E-02	1,67E-02	2,38E-02	3,22E-02	4,17E-02	5,20E-02
e15	3,84E-04	8,62E-04	1,74E-03	3,23E-03	5,54E-03	8,87E-03	1,34E-02	1,92E-02	2,63E-02	3,45E-02
e16	1,31E-04	3,20E-04	7,03E-04	1,40E-03	2,58E-03	4,40E-03	7,08E-03	1,07E-02	1,55E-02	2,15E-02
e17	4,18E-05	1,12E-04	2,66E-04	5,72E-04	1,13E-03	2,06E-03	3,51E-03	5,65E-03	8,63E-03	1,26E-02
e18	1,26E-05	3,69E-05	9,51E-05	2,20E-04	4,65E-04	9,06E-04	1,64E-03	2,80E-03	4,52E-03	6,93E-03
e19	3,61E-06	1,15E-05	3,22E-05	8,02E-05	1,82E-04	3,77E-04	7,28E-04	1,32E-03	2,24E-03	3,62E-03
e20	9,79E-07	3,41E-06	1,03E-05	2,77E-05	6,73E-05	1,49E-04	3,06E-04	5,86E-04	1,05E-03	1,79E-03
e>20	3,33E-07	1,30E-06	4,41E-06	1,32E-05	3,53E-05	8,63E-05	1,94E-04	4,07E-04	7,99E-04	1,48E-03

A TPC para o nó “Evidência” foi preenchida considerando uma distribuição binomial para a evidência. Considerando os possíveis estados para os seus nós pais, a TPC foi preenchida com base na Eq. (52).

$$P(E|Subpopulação\ 1, Subpopulação\ 2, Campo, Peso) = \begin{cases} Binomial(E, HEP_{Sub1}, n) = \binom{n}{k} HEP_{Sub1}^k (1 - HEP_{Sub1})^{n-k}, & peso = Sub1 \\ Binomial(E, HEP_{Sub2}, n) = \binom{n}{k} HEP_{Sub2}^k (1 - HEP_{Sub2})^{n-k}, & peso = Sub2 \end{cases} \quad (52)$$

Na Eq. (52), E representa os estados do nó “Evidência”, conforme apresentados na primeira coluna da Tab. 6 (isto determina o valor de k), HEP_{Sub1} se refere ao emprego dos estados do nó “Subpopulação 1” ($Sub1$, na equação), HEP_{Sub2} se refere ao emprego dos estados do nó “Subpopulação 2” ($Sub2$, na equação). O número n de tentativas é inserido no nó “Campo”, que é determinístico. Este nó refere-se à quantidade de oportunidades para ocorrência do erro em estudo. Para o exercício, n é igual a 1000.

O nó “Peso” determina a probabilidade de cada subpopulação representar a variabilidade populacional (da população). Sendo assim, foram determinados dois estados para este nó: “Subpopulação 1” e “Subpopulação 2”. Para a obtenção das probabilidades a priori para os estados deste nó, foi empregada a distribuição uniforme (não há indício de que os dados de HEP da subpopulação 1 sejam mais

representativos do que os dados da subpopulação 2 – o recíproco também não foi indicado). A TPC para este nó está apresentada na Tab. 9.

Tab. 9 – TPC para o nó “Peso”

<i>Subpopulação 1</i>	<i>Subpopulação 2</i>
0,5	0,5

O nó “População” representa a variabilidade populacional para a HEP, $\phi(HEP)$. Este nó é dependente dos nós para as subpopulações e do nó “Peso”. Para o exemplo, estão sendo considerados 21 estados, com valores entre 0 e 10^{-2} (esta discretização foi realizada tendo em vista as características do problema modelado pela RB; as HEP deste intervalo apresentam mais de 99,99% de probabilidade de ocorrência, dentre as HEP de cada subpopulação). Cada estado representa um intervalo, e os intervalos foram associados na TPC para este nó conforme a Tab. 10.

O nó “População” é determinístico, sendo que o preenchimento de sua TPC foi realizado de acordo com a Eq. (53).

$$P(\text{População} | \text{Subpopulação 1}, \text{Subpopulação 2}, \text{Peso}) = \begin{cases} 100\%, & HEP_{Pop} = HEP_{Sub1} \text{ e } \text{Peso} = \text{Subpopulação 1} \\ 100\%, & HEP_{Pop} = HEP_{Sub2} \text{ e } \text{Peso} = \text{Subpopulação 2} \\ 0, & \text{demais combinações dos estados dos nós pais} \end{cases} \quad (53)$$

Tab. 10 – Estados para o nó “População”

<i>Estado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Estado</i>	<i>Intervalo</i>
HEP000	(0,00000;0,00000)	HEP055	(0,00525;0,00575)
HEP005	(0,00000;0,00075)	HEP060	(0,00575;0,00625)
HEP010	(0,00075;0,00125)	HEP065	(0,00625;0,00675)
HEP015	(0,00125;0,00175)	HEP070	(0,00675;0,00725)
HEP020	(0,00175;0,00225)	HEP075	(0,00725;0,00775)
HEP025	(0,00225;0,00275)	HEP080	(0,00775;0,00825)
HEP030	(0,00275;0,00325)	HEP085	(0,00825;0,00875)
HEP035	(0,00325;0,00375)	HEP090	(0,00875;0,00925)
HEP040	(0,00375;0,00425)	HEP095	(0,00925;0,00975)
HEP045	(0,00425;0,00475)	HEP100	(0,00975;0,01000)
HEP050	(0,00475;0,00525)		

Na Eq. (53), HEP_{Pop} , HEP_{Sub1} e HEP_{Sub2} representam os estados das variáveis *População*, *Subpopulação 1* e *Subpopulação 2*, respectivamente.

A TPC para o nó “População” apresenta 882 entradas. Como exemplo, a Tab. 11 apresenta as primeiras 21 entradas desta TPC.

A RB modelando este exemplo está apresentada na Fig. 16.

Tab. 11 – TPC para o nó “População” (primeiras entradas)

Peso	Subpopulação 1	Subpopulação 2	Estado
Subpopulação 1	HEP000	HEP000	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP005	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP010	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP015	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP020	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP025	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP030	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP035	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP040	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP045	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP050	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP055	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP060	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP065	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP070	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP075	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP080	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP085	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP090	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP095	HEP000
Subpopulação 1	HEP000	HEP100	HEP000

Fig. 16 – Rede bayesiana para o exemplo do segundo método

Para esta RB (apresentada na Fig. 16), foi considerada a evidência de 5 erros ($k=5$, ocorrência do estado “e5” do nó “Evidência”) em 1000 oportunidades, sendo obtidos os resultados apresentados na Fig. 17.

Fig. 17 – Rede bayesiana da Fig. 16 atualizada

Verificam-se na Fig. 17 os valores atualizados para as probabilidades dos estados do nó “Peso”. Foram obtidos os mesmos resultados apresentados na Eq. (45) para a distribuição da probabilidade dos parâmetros, dada a evidência de 5 erros em 1000 tentativas, no exemplo de aplicação do primeiro método. Este resultado era esperado porque foram assumidas as mesmas condições nos dois exemplos de aplicação. Sendo assim, a discussão sobre os resultados apresentada para o primeiro método (vide o item 2.3.1.2) é aproveitada para os resultados da aplicação do segundo.

2.4 SISTEMAS COMPLEXOS: CONCEITO E CARACTERÍSTICAS

O estudo dos sistemas complexos visa ao entendimento das relações e interações entre os elementos do sistema e entre o sistema e o meio ambiente, e de como se origina o comportamento coletivo. *Sistema complexo* é um termo utilizado em diferentes áreas do conhecimento – e.g. engenharia, física, biologia, sociologia, economia, geologia, meteorologia, antropologia, neurociência e psicologia –, sendo que, na literatura científica, não há um consenso sobre o seu significado (COUTURE, 2007). De forma geral, os sistemas complexos são definidos em função de suas características, dentre as quais, as mais comumente citadas são:

- a) Apresentam-se como um conjunto de elementos autônomos que trabalham juntos para atingir um objetivo ou missão (MITCHELL, 2009);
- b) Estão aninhados em outros sistemas – a maioria dos quais são partes de outros sistemas –, são sistemas de muitos sistemas menores (SCHNEIDER; SOMERS, 2006);
- c) Em resposta às interações locais com outros elementos ou com o meio ambiente, os seus elementos apresentam uma variedade de comportamentos (NORMAN; KURAS, 2006; MITCHELL, 2009);
- d) Separadamente, os seus elementos não podem atingir o mesmo resultado que o conjunto – o todo é maior que a soma das partes (NUSSENZWEIG, 1999). É difícil, se não impossível, estudar suas propriedades através da decomposição de suas partes (NORMAN; KURAS, 2006);
- e) As interações entre os seus elementos resultam em fenômenos emergentes (LEWES, 2005) que não podem ser ligados diretamente às propriedades destes elementos (MITCHELL, 2009) – estes fenômenos são decorrentes, em grande parte, das relações não lineares entre os elementos (NUSSENZWEIG, 1999);
- f) Mesmo quando as relações entre os seus componentes são simples e determinadas, o comportamento do todo é difícil de prever no médio ou no longo prazo (MITCHELL, 2009);
- g) São não lineares e apresentam retroalimentação (NUSSENZWEIG, 1999);
- h) Desenvolvem-se à beira do caos (KAUFFMAN, 1995), onde a variedade de possibilidades e a liberdade criativa permitem novas experiências

- (SCHNEIDER; SOMERS, 2006);
- i) Exibem coerência frente às mudanças, resiliência (DEKKER, 2005) e auto-organização [ordem emergente (NUSSENZWEIG, 1999)] – no sentido de proporcionarem a si mesmos as condições e os meios para a subsistência e o alcance de suas finalidades (SCHNEIDER; SOMERS, 2006) – via ações condicionais e antecipação, isto sem planejamento ou direção centralizada;
 - j) São dinâmicos, com quebra de ergodicidade (NORMAN; KURAS, 2006) e histerese (NUSSENZWEIG, 1999);
 - k) Exibem aprendizado e estão em evolução constante (NUSSENZWEIG, 1999) – sendo observado o fenômeno da coevolução (entre o sistema e o ambiente) (SCHNEIDER; SOMERS, 2006);
 - l) São fundamentalmente não determinísticos (apresentam aleatoriedade), sendo difícil, se não impossível, prever o seu comportamento, mesmo conhecendo as funções que o compõem (NUSSENZWEIG, 1999);
 - m) Em muitos casos, exibem estrutura fractal (NUSSENZWEIG, 1999).

Considerando o significado mais usual nos trabalhos de análise de confiabilidade e de APS de instalações industriais, o termo *sistema complexo* é adotado nesta tese com o sentido definido por Perrow (1999) que relaciona – numa leitura mais adequada à fase de concepção – os aspectos do sistema que podem levar (quando exposto ao ambiente operacional) ao comportamento apresentado nos parágrafos precedentes. Assim, no escopo deste trabalho, são considerados complexos os sistemas que apresentam as seguintes características:

- a) *Proximidade das partes*: pouco espaço entre os equipamentos ou entre as etapas de produção;
- b) *Interconexão*: muitas conexões entre os equipamentos que não estão em uma sequência de produção;
- c) *Isolamento da falha*: possibilidade limitada de isolamento de componentes falhos (e.g. baixa capacidade de substituição);
- d) *Substituição de recursos*: baixa capacidade de substituir recursos e materiais (emprego intensivo de pessoal especializado);
- e) *Retroalimentação*: presença de retroalimentação (pouco familiar ou não intencionada);

- f) *Parâmetros de controle*: muitos parâmetros de controle com interações potenciais;
- g) *Fontes de informação*: as fontes de informação são indiretas ou inferenciais;
- h) *Entendimento limitado*: alguns processos não são completamente compreendidos.

É interessante notar que, conforme ressaltado por Perrow (1999), as características apresentadas no início desta seção (e.g. fenômenos emergentes, comportamento aleatório) são potencializadas em sistemas complexos expostos às seguintes condições operacionais: a) processos dependentes do tempo – esperas não podem ocorrer; b) processos rigidamente ordenados – com poucas alternativas disponíveis; c) caminho único para o cumprimento da meta do sistema, e; d) poucas folgas – e.g. quantidades precisas de recursos (equipamentos e pessoas). Como exemplo de sistema complexo em que isto ocorre, podem ser citados os sistemas que compõem as plantas nucleares (PERROW, 1999).

2.5 TAXONOMIAS PARA AS AÇÕES E ERROS HUMANOS

Nesta tese, o termo *taxonomia* – com origem nas palavras gregas *táxis* (ordem, arranjo) e *nomos* (lei, norma) – está sendo empregado no sentido de *técnica para a classificação sistemática em categorias pré-definidas*. Como será visto mais adiante nesta tese (especialmente na subseção 5.2.2 e na seção 6.3), as taxonomias das ações humanas e dos erros humanos são fundamentais no emprego da TECHR – elas determinam as ações e os tipos de erro que compõem os modelos prospectivos de desempenho humano que resultam de sua aplicação.

Como parte da pesquisa para o desenvolvimento de um modelo prospectivo de desempenho humano genérico (um dos objetivos deste projeto de pesquisa) – a priori, aplicável à concepção de qualquer sistema –, procurou-se uma taxonomia abrangente e suficientemente detalhada, que permitisse a classificação das ações humanas a serem desempenhadas em contextos ainda não observados – de forma adequada à consideração das ações humanas na fase de concepção.

Nesta pesquisa, não foi encontrada uma taxonomia das ações humanas de

aceitação universal. Verificou-se, no entanto, que cada autor apresenta uma taxonomia própria, voltada aos interesses do seu trabalho. Assim, as várias taxonomias das ações humanas encontradas cobrem campos específicos de estudo, com diferentes graus de detalhamento – e.g. objetivos educacionais (BLOOM et al., 1956; KRATHWOHL; BLOOM; MASIA, 1969; HARROW, 1972), atividades cognitivas no ambiente de trabalho (RASMUSSEN; DUNCAN; LEPLT, 1987; RASMUSSEN et al., 1981), indústria nuclear (SWAIN; GUTTMANN, 1983), treinamento em ambiente virtual (FARDINPOUR; REINERS, 2014), reconhecimento de imagem (YAO et al., 2011), automação (PARASURAMAN; SHERIDAN; WICKENS, 2000).

A Taxonomia dos Objetivos Educacionais [ou taxonomia de Bloom (1956)] apresentou-se como a mais aderente ao propósito da primeira aplicação da TECHR – i.e., desenvolver um modelo prospectivo de desempenho humano genérico. Três de suas características explicam esta aderência: 1) *Abrangência*: em princípio, a taxonomia de Bloom permite classificar qualquer ação humana observável (à qual possa ser associado um objetivo educacional); 2) *Detalhamento*: esta taxonomia permite a classificação consistente das ações humanas classificáveis nas demais taxonomias encontradas, e; 3) *Independência do contexto de desempenho* (não foi desenvolvida para uma indústria específica) – a seção 6.2 detalha o estado atual desta taxonomia.

Para encerrar esta seção, faz-se necessária uma discussão sobre as taxonomias dos erros humanos (semelhante à apresentada acima para o caso das taxonomias das ações humanas). Optou-se, entretanto, por apresentá-la no corpo do capítulo 5 (vide a subseção 5.2.1) – isto porque muitas das técnicas apresentadas ao longo daquele capítulo (e consideradas para a composição da base de dados para o modelo prospectivo desenvolvido) trazem taxonomias específicas para o erro humano, de forma explícita ou implícita (KIRWAN, 1994).

3 METODOLOGIA PARA A CONCEPÇÃO DE SISTEMAS

O desenvolvimento de qualquer projeto complexo passa pelas atividades de tratamento e análise das informações disponíveis. Estas informações podem ser classificadas em dois grupos: 1) informações diretamente relacionadas às necessidades a serem atendidas pelo sistema, i.e., que definem os critérios de projeto; e 2) tecnologia disponível para o atendimento destas necessidades.

As informações no primeiro grupo definem as condições de contorno a serem respeitadas pelo sistema: insumos e interfaces, trabalho a ser executado e suas características, confiabilidade exigida, contexto industrial, etc.

As informações no segundo grupo podem ser subclassificadas em dois subgrupos: 1) dependentes do primeiro grupo; e 2) independentes do primeiro grupo. As informações dependentes referem-se principalmente às limitações tecnológicas de equipamentos específicos (e.g., aplicável à indústria em contexto). As independentes referem-se a tecnologias e insumos genéricos, i.e., a priori independentes (e.g., elemento humano), e que devem ser adequados à aplicação.

No processo de projeto há, portanto, a necessidade de confrontação entre os dois grupos de informações mencionados acima. Para que haja racionalidade, é necessário que estas informações se apresentem de forma comparável. As ações requeridas do sistema (para que as limitações impostas pelo primeiro grupo de informações sejam respeitadas) e as funções dos possíveis agentes destas ações (obtidas do segundo grupo de informações) representam características comparáveis pelo pessoal envolvido no projeto.

As funções dos possíveis componentes do sistema podem ser obtidas pelas amplamente difundidas técnicas de *Análise Funcional* (MODARRES; KAMINSKIY e KRIVTSOV, 2010; RAUSAND; HOYLAND, 2004), já que se assume que estes sejam equipamentos e recursos prontos. O levantamento das ações requeridas do sistema é uma atividade mais complexa, sendo que as também difundidas técnicas de *Análise de Tarefas* (ANNETT, 2004; STANTON, 2006; KIRWAN; AINSWORTH, 1992) podem ser exploradas para este fim.

Definida a sequência de atividades a serem atendidas, é possível levantar os recursos necessários para que cada atividade ou grupo de atividades se realize. Isto

pode ser feito qualitativamente pela comparação das diversas funções extraídas das informações relativas à tecnologia disponível, i.e., dada uma ação, verifica-se quais recursos possuem funções compatíveis com a execução da ação. Sendo assim, tanto os equipamentos disponíveis quanto o elemento humano são ponderados de forma integrada na fase de concepção do sistema.

Dados os requisitos de projeto, as informações sobre confiabilidade podem ser exploradas na escolha dos elementos que devem compor o sistema (componentes e operadores). Há muitas formas de se fazer o aproveitamento destas informações. Em uma abordagem mais comum, a confiabilidade é introduzida de forma quantitativa somente após a concepção do sistema, i.e., dado o sistema, estima-se a confiabilidade de seus componentes para compor sua confiabilidade e, assim, avaliar sua adequação aos requisitos de projeto. Desta forma, durante a concepção, a consideração da confiabilidade é feita de forma qualitativa pelas pessoas envolvidas nesta fase, sendo a análise quantitativa reservada para fases mais avançadas do projeto. A Fig. 18 ilustra esta condição.

Fig. 18 – Consideração da confiabilidade em cada fase do projeto

Esta abordagem traz desafios relevantes quando há necessidade de melhora da confiabilidade do sistema, por exemplo: 1) resistência em voltar à fase de concepção para introduzir as alterações necessárias para o atendimento dos requisitos de projeto (em especial devido aos custos envolvidos); 2) havendo o retorno à fase de concepção, indefinição sobre como atuar no sistema para aumentar a confiabilidade; e 3) no caso das ações do sistema executadas pelo elemento humano, consideração equivocada de que sua adaptabilidade pode resolver qualquer limitação.

Em uma abordagem menos comum, a confiabilidade é considerada quantitativamente ainda na fase de concepção, como instrumento para a tomada de decisão sobre os agentes que devem compor o sistema (tanto equipamentos quanto operadores). A Fig. 19 ilustra esta condição.

Fig. 19 – Consideração da confiabilidade em cada fase do projeto na metodologia

Com esta abordagem a escolha do componente também é feita quantitativamente em função de sua confiabilidade, sendo considerado o grupo de componentes capazes de atender a uma determinada atividade, definido qualitativamente em fase anterior pelo estudo das informações sobre a tecnologia disponível, conforme discutido anteriormente.

Com base nestes conceitos, foi desenvolvida uma metodologia para a concepção de sistemas complexos, conforme apresentada nas duas seções seguintes: a primeira detalha as atividades propostas em cada uma das nove etapas cíclicas e interdependentes da metodologia, e a segunda, com o propósito de facilitar o entendimento destas etapas, apresenta um exemplo simplificado, com o emprego da metodologia na concepção de um sistema de resfriamento – ressalte-se que este conteúdo foi apresentado de forma preliminar por Martins, Frutuoso e Melo & Maturana (2015).

3.1 ETAPAS DA METODOLOGIA

Como resposta às necessidades e limitações levantadas no Capítulo 1, e considerando a discussão acima, é proposto que a confiabilidade seja considerada quantitativamente ainda na fase de concepção, como instrumento para a tomada de decisão sobre os agentes que devem compor o sistema (tanto equipamentos quanto operadores). Neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia em nove etapas para a consideração precoce da confiabilidade humana no projeto de sistemas complexos. Suas etapas foram ordenadas conforme o fluxograma da Fig. 20, sendo descritas a seguir:

Fig. 20 – Etapas da metodologia (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015)

- **Etapa 1 – Cenário:** Esta atividade consiste no levantamento de toda informação que auxilie na definição das necessidades que devem ser atendidas pelo sistema em projeto. Para que esta informação seja aproveitada nas etapas posteriores, é elaborado o cenário operacional, constituindo-se da representação de todas as condições a serem enfrentadas pelo sistema em projeto e dos limites a serem respeitados – incluindo características de confiabilidade e interfaces com sistemas pré-existentis ou já projetados;
- **Etapa 2 – Análise de tarefas:** Esta etapa é dedicada à elaboração de uma sequência de atividades que atendam ao cenário proposto na Etapa 1 (KIRWAN; AINSWORTH, 1992; SHEPHERD, 1989; STANTON, 2006). A estas atividades serão associadas as ações do sistema em projeto para que os requisitos pré-estabelecidos sejam respeitados. Idealmente, este desencadeamento será composto com a maior quantidade possível de ações humanas. Eventualmente surgirão tarefas que não poderão ser exercidas pelo elemento humano e, após a sua identificação, serão procurados equipamentos disponíveis na planta (caso se trate de um projeto de alteração) para sua execução; quando não disponíveis (ou não se trate de um projeto de alteração) podem ser registradas propostas que serão analisadas em etapas subsequentes da metodologia;
- **Etapa 3 – Tecnologia disponível:** Este tópico é dedicado à formação de um banco de dados dos equipamentos aplicáveis à área para a qual o sistema está sendo desenvolvido. Deve ser definido um grupo de

equipamentos não limitado pela tecnologia que é de uso corrente na área (isto será mais evidente em projetos de alteração, quando devem ser incluídos os equipamentos já disponíveis na planta), i.e., podem ser considerados equipamentos utilizados em outras áreas, se aplicáveis. Apesar de não discriminado na Fig. 20, há flexibilidade para a inclusão de novos equipamentos neste grupo em qualquer etapa da concepção;

- ***Etapas 4 – Funções dos equipamentos:*** Para os equipamentos listados na Etapa 3, deve ser elaborada uma tabela com dados funcionais e de confiabilidade para cada função. As funções destes componentes podem ser obtidas pelas amplamente difundidas técnicas de *Análise Funcional* (RAUSAND; HOYLAND, 2004; MODARRES; KAMINSKIY; KRIVITSOVS, 2010). A cada função do equipamento é possível associar uma confiabilidade, i.e., uma probabilidade de atendimento da função em relação ao tempo de missão. Em associação a isto, é importante que seja considerada a incerteza dos dados (que permitirá a propagação de incertezas em fases posteriores);
- ***Etapas 5 – Funções humanas:*** O resultado desta etapa é uma lista de atividades humanas (funções associadas ao homem), organizadas conforme uma taxonomia das ações humanas, associadas às respectivas funções de densidade de probabilidade de erro humano. Sendo assim, esta etapa da metodologia consiste na elaboração de um modelo para o elemento humano direcionado à área de aplicação do sistema em desenvolvimento. Com o propósito de auxiliar nesta etapa, foi desenvolvida a TECHR, técnica quantitativa para a consideração da confiabilidade humana na fase inicial do projeto de sistemas, focada na elaboração de modelos prospectivos de desempenho humano quantitativos e atualizáveis, classificando os erros e as ações humanas segundo as taxonomias de Reason (1990) e de Bloom (1956), respectivamente. Esta técnica e um modelo obtido com a sua aplicação são apresentadas nos Capítulos 4, 5 e 6 desta tese;
- ***Etapas 6 – Agrupamento dos agentes:*** Esta é a primeira etapa do ciclo de elaboração da solução – discriminado em vermelho na Fig. 20. Para cada atividade requerida (conforme descrita na Etapa 2) define-se o grupo de possíveis agentes, dentre os apresentados nas Etapas 4 e 5. Considerando

que haverá forte dependência entre ações subsequentes, para cada ação pondera-se a ação anterior (agente escolhido na iteração anterior do ciclo de elaboração da solução, ver Fig. 20). Preferencialmente, realiza-se esta etapa com o envolvimento de engenheiros, projetistas e especialistas em fatores humanos. Ressalte-se que esta etapa não altera a sequência de atividades definidas na Etapa 2. É possível, no entanto, que se solucionem várias atividades em bloco (e.g., uma sequência realizada por um equipamento disponível no mercado);

- **Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade:** Nesta etapa, serão identificados os agentes que representam maior confiabilidade para o sistema, ponderando os dados de incerteza sobre as estimativas obtidas nas Etapas 4 e 5 da metodologia. Esta análise permitirá a comparação, mesmo que qualitativa, entre os possíveis agentes – ressalte-se que a comparação é possível apenas para sequências equivalentes de ações. Como subsídio para esta etapa, e considerando a lista de agentes para as ações gerada na etapa anterior (Etapa 6), será realizado o detalhamento da RB que modela a confiabilidade do sistema – sendo alimentada pelos dados de confiabilidade para ações já solucionadas (com agentes já definidos), onde os nós representam as atividades e agentes (levantados na Etapa 6) e as probabilidades representam as confiabilidades dos agentes (definidas nesta Etapa 7), sendo assumido o sucesso nas atividades ainda não modeladas –, e considerado os resultados das inferências realizadas sobre esta RB.
- **Etapa 8 – Confiabilidade do sistema:** Esta é a última etapa do ciclo de elaboração da solução (em vermelho na Fig. 20). Ela é composta pela decisão sobre se a equipe deve continuar a solucionar a sequência de atividades resultante da Etapa 2 e, em caso afirmativo, pela decisão sobre como continuar o desenvolvimento. Isto será feito essencialmente pelo acompanhamento da RB em desenvolvimento (vide a descrição na Etapa 7). O resultado esperado desta etapa depende da análise da confiabilidade da sequência de agentes já escolhidos – e.g., podem ser feitas inferências sobre a RB para determinar os agentes que mais contribuem para a falha. Caso esta confiabilidade atenda às características exigidas para o sistema, deve-se dar continuidade à elaboração da solução, aplicando a Etapa 6

para a próxima ação (ou atividade), reiniciando o ciclo, ou para a Etapa 9, última da metodologia, se não houver ação pendente. Caso não atenda, o usuário pode escolher uma ação anterior para reiniciar a concepção (ressalte-se que, devido à dependência entre ações subsequentes, esta escolha determina a quantidade de ações a serem reavaliadas) ou, na hipótese de não ser isolada uma ação anterior (caso da primeira ação da sequência), pode-se reconsiderar: 1) A sequência desenvolvida na Etapa 2, incluindo novas atividades – agora com o apoio dos dados obtidos na RB – e/ou redundâncias; ou 2) Inclusão de novas tecnologias para a ponderação – retomando a Etapa 3;

- ***Etapa 9 – Descrição da solução:*** Esta etapa é para a descrição do sistema, apresentando a confiabilidade da solução encontrada, bem como resultados das análises de incerteza.

Esta sequência pode ser adaptada em função das necessidades do projeto. Pode ocorrer, por exemplo, a necessidade de desenvolver apenas o procedimento operacional de determinado sistema (vide o Capítulo 7). Neste caso, as Etapas 3 e 4 seriam ignoradas. Tecnicamente, esta metodologia não deverá precisar de informações extras para a elaboração de projetos novos se forem fornecidas as seguintes informações: 1) Cenário; 2) Tecnologia disponível: descrição das funções e da confiabilidade dos equipamentos que podem ser utilizados (grupo possível de funções), além das incertezas destes dados (em especial da confiabilidade, que será o parâmetro a ser comparado em fases posteriores); e 3) Modelo de desempenho humano. A fim de facilitar o entendimento desta metodologia, será demonstrada uma aplicação simplificada na concepção de um sistema hipotético, que visa à manutenção da temperatura de um tanque entre limites definidos.

3.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

O problema proposto refere-se à concepção de um sistema para garantir a manutenção da temperatura da água de um tanque entre limites pré-estabelecidos. Neste exemplo de aplicação, serão ignoradas as etapas referentes aos cálculos estequiométricos, análises térmicas, balanços de carga, cálculo de carga de bombas, perdas de carga e quaisquer informações ou procedimentos de projeto que não sejam relevantes para a consideração da confiabilidade do sistema ou que

tornem este exemplo excessivamente complexo. Além disto, nesta aplicação hipotética não está sendo considerada a propagação de incertezas. Desta forma, os resultados apresentados nesta seção se limitam apenas a demonstrar as etapas da metodologia.

3.2.1 Etapa 1 – Cenário

O cenário operacional para o sistema hipotético em concepção refere-se à manutenção da temperatura de um tanque com as características apresentadas na Tab. 12 – nesta tabela, t_1 é a menor temperatura de projeto e t_2 é a maior temperatura de projeto (considera-se que os materiais sejam especificados para operar neste intervalo). Internamente ao tanque em questão, apresenta-se uma fonte de calor capaz de elevar sua temperatura de t_1 a t_2 em aproximadamente 7 dias – a incerteza neste valor é atribuída à variabilidade das condições ambientais –, sendo que o calor gerado por esta fonte deixa de ser significativo após 10 dias de sua inserção no tanque (este evento ocorre anualmente).

Considera-se que a elevação de temperatura ocorre homogeneamente no referido tanque e que a fonte fornece calor continuamente. Assume-se também que t_1 seja igual à temperatura ambiente. Além de que, é necessário que não haja troca da água do tanque, i.e., que a água que entra em contato com a referida fonte de calor seja a mesma durante toda a operação. Espera-se a elaboração de uma solução que apresente alta confiabilidade, com probabilidade de falha durante a vida útil menor que 10%. Como parte do programa de manutenção preventiva, o sistema é inspecionado, reparado e testado anualmente (por conta do desgaste e envelhecimento observado no período de inatividade), sendo considerado tão bom quanto novo após este procedimento. Além disto, o tanque a ser resfriado apresenta-se no interior de um prédio e não há restrição espacial importante em seu entorno, e em suas proximidades estão instaladas redes de ar comprimido e cabeamento elétrico com abundante capacidade ociosa e disponibilidade.

Tab. 12 – Características do tanque

Descrição	Medida	Unidade
Limites de Temperatura	$[t_1 ; t_2]$	°C
Volume	45	m ³
Pressão	1	atm
Vida Útil	30	ano

3.2.2 Etapas cíclicas

Dadas as condições de contorno na subseção anterior, aplicam-se as etapas cíclicas da metodologia (conforme discriminadas na seção 3.1), iniciando-se pela elaboração de uma sequência de atividades que atendam ao cenário apresentado (Etapa 2) e pelo levantamento da tecnologia aplicável a este contexto (Etapa 3). Neste exemplo, será exposta apenas uma primeira iteração nas etapas cíclicas.

3.2.2.1 Etapa 2 – Análise de tarefas

Para a determinação da sequência inicial de tarefas, foi empregada a *Hierarchical Task Analysis* (HTA) (KIRWAN; AINSWORTH, 1992; SHEPHERD, 1989), conforme descrita em por Stanton (2006). Esta heurística prevê os passos presentes na Fig. 21 – existem outras abordagens para a análise de tarefas [e.g., GOMS: *Goals, Operators, Methods and Selection Rules* (KIERAS, 2003)], mas a HTA foi escolhida por sua aderência aos objetivos das primeiras etapas da metodologia proposta. A Fig. 21 também associa os passos da HTA às etapas da metodologia. Assim, considerando o contexto descrito na Etapa 1 da metodologia, obtiveram-se os objetivos primários para o sistema em concepção: 1) Manter a temperatura do tanque entre t_1 e t_2 ; e 2) Manter o inventário do tanque. Seguindo o apresentado em (STANTON, 2006), a aplicação da HTA levou a uma primeira discretização dos objetivos do sistema em concepção, e a associação de possíveis atividades humanas para o seu cumprimento, conforme a Tab. 13.

Nesta primeira iteração nas etapas cíclicas da metodologia (ver a Fig. 20), considerou-se suficiente a discretização dos objetivos até o nível secundário, conforme apresentado na Tab. 13. O cumprimento dos objetivos secundários leva ao cumprimento dos objetivos primários. Existe um tempo de 7 dias para que a temperatura do tanque atinja o limite superior. Assim, considerou-se que o sistema não operará continuamente para atender ao objetivo 1, mas entrará em operação tão logo a temperatura atinja t_2 . Sendo assim, ao objetivo 1 associou-se o objetivo secundário 1.3, de monitoração e controle do sistema em concepção. O mesmo não foi considerado para o objetivo 2. Para a geração das ações humanas apresentadas

na tabela, considerou-se que o objetivo 2 pode ser alcançado por meio de componentes passivos e que, portanto, não exigem o controle de estado para o cumprimento de seu propósito.

Tab. 13 – Objetivos do sistema e ações humanas associadas

<i>Primários</i>		<i>Secundários</i>	<i>Ações Humanas</i>
1	Manter a temperatura do tanque entre t_1 e t_2	1.1 Remover calor da água do tanque	1.1.1 Projeto
			1.1.2 Instalação
			1.1.3 Inspeção
			1.1.4 Manutenção
	1.2 Transferir o calor removido da água para o meio ambiente	1.2	1.2.1 Projeto
			1.2.2 Instalação
			1.2.3 Inspeção
			1.2.4 Manutenção
	1.3 Monitorar o estado do sistema e controlar suas ações	1.3	1.3.1 Identificar temperatura do tanque
			1.3.2 Comparar com a temperatura de interesse
			1.3.3 Decidir atuar no sistema
			1.3.4 Atuar iniciando ou encerrando as ações do sistema relacionadas aos objetivos 1.1 e 1.2
2	Manter o inventário do tanque	2.1 Impedir a entrada de outros fluidos (contato com a água do tanque)	2.1.1 Projeto
			2.1.2 Instalação
			2.1.3 Inspeção
			2.1.4 Manutenção
	2.2 Impedir a saída de água do tanque (contato com outros fluidos e o meio ambiente)	2.2	2.2.1 Projeto
			2.2.2 Instalação
			2.2.3 Inspeção
			2.2.4 Manutenção

Fig. 21 – Passos da HTA associados às fases da metodologia

Ainda na Tab. 13, para todos os objetivos que não podem ser alcançados exclusivamente por ações humanas, foram associadas ações em seu projeto, instalação, inspeção e manutenção, que são necessárias para garantir os objetivos listados e que são tipicamente humanas. No entanto, para resguardar a simplicidade deste exemplo, estas atividades serão ignoradas nos próximos passos de aplicação desta metodologia. Assim, tomando como base os objetivos e ações apresentados

na a Tab. 13, é possível organizar uma sequência lógica de atividades a serem desenvolvidas pelo sistema que atendam ao cenário proposto na Etapa 1, i.e., um desencadeamento de eventos que resultem das ações do sistema em projeto para que os requisitos pré-estabelecidos sejam respeitados. A Fig. 22 apresenta uma primeira sequência com estas características. Esta é a sequência que será explorada nas próximas etapas deste exemplo. Na Fig. 22, as atividades destacadas são aquelas em que não se espera a atuação humana direta, i.e., são atividades a serem executadas por equipamentos.

Fig. 22 – 1ª sequência de atividades

3.2.2.2 Etapa 3 – Tecnologia disponível

Em princípio, podem-se associar ao cenário proposto os equipamentos da indústria de processos. Assim, foram escolhidos os equipamentos apresentados na Tab. 14 para a primeira iteração nesta aplicação da metodologia, i.e., primeira iteração no 1º ciclo da metodologia. Esta tabela representa o banco de dados de equipamentos a ser observado nos próximos passos da metodologia. Como pode ser verificado, não estão listados todos os equipamentos da indústria de processos aplicáveis ao problema proposto. Dois argumentos justificam esta escolha: o primeiro, é a necessidade de simplificar este exemplo, i.e., facilitar a compreensão desta aplicação hipotética; e o segundo, reflete a proposta de uma metodologia cíclica, em que a solução para o problema apresentado é encontrada por meio da evolução iterativa do projeto nas etapas da metodologia. Sendo assim, caso necessário, outros equipamentos serão incluídos nesta lista em iterações posteriores.

Tab. 14 – Equipamentos para o 1º ciclo

<i>Código</i>	<i>Descrição</i>
BB1	Bomba
BC1	Conjunto: motor, transmissão e bomba
CC1	Conjunto: controlador de temperatura – sensor e processador
CN1	Conexões
CO1	Controlador digital
EV1	Trocador de calor: evaporativo (torre de resfriamento)
MG1	Mangueiras
MO1	Motor
SA1	Sinal auditivo: buzina e circuito
SL1	Sinal luminoso: lâmpada e circuito
ST1	Sensor de temperatura (transdutor)
TB1	Tubos
TC1	Trocador de calor: casco-tubo
VA1	Válvula
VC1	Conjunto: válvula com atuação por motor elétrico
VC2	Conjunto: válvula com atuação por solenóide
VC3	Válvula: atuação por ar comprimido
VP1	Vaso: pressão atmosférica

3.2.2.3 Etapa 4 – Funções dos equipamentos

Os equipamentos listados na Tab. 14 podem exercer as funções apresentadas na Tab. 15. Nesta tabela também estão apresentados dados disponíveis necessários para o cálculo da confiabilidade dos componentes. Para este exemplo estão sendo apresentadas apenas as funções essenciais dos equipamentos listados na Etapa 3. As funções apresentadas na Tab. 15 podem, por exemplo, ser obtidas diretamente de planilhas de FMEA/FMECA (*Failure Mode and Effect Analysis / Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) que compõem as análises de confiabilidade de equipamentos e sistemas (RAUSAND; HOYLAND, 2004). Os dados de confiabilidade também podem ser obtidos destas análises ou diretamente de bancos de dados (AICHE, 1989).

Os dados apresentados na terceira coluna da Tab. 15 foram extraídos de AICHe (1989) e de Det Norske Veritas (2009). Partindo destes dados, foram calculadas as probabilidades de estes equipamentos falharem em uma hora de operação (isto porque, para este exemplo, o critério de aprovação, discutido na seção 3.2.2.5, refere-se a uma hora de operação). Para tanto, considerou-se que os tempos de falha seguem distribuições exponenciais – isto porque considera-se a fase operacional e o curto período de uso; as fases operacionais não durarão mais que 10 dias (por ano) intercalados por inspeção, manutenção e testes (vide o item 3.2.1).

Tab. 15 – Funções e confiabilidade dos equipamentos para o 1ª ciclo

Funções		Dados de Confiabilidade		
		Ref.*	Taxa Média de Falhas [Incerteza] (1,00E-6 hs)**	P(Falha em 1 hora)
BB1	Conversão da energia mecânica em hidráulica, proporcionando o escoamento da água.	DNV	124,59 [2,50 ; 386,40]	1,25E-04
BC1	Conversão da energia elétrica em hidráulica, proporcionando o escoamento da água.	AIChE	104,0 [0,812 ; 450,0]	1,04E-04
CC1	Detectar e processar a temperatura, comparar com padrões e emitir os sinais para a atuação no sistema.	DNV	24,68 [5,88 ; 54,09]	2,47E-05
CN1	Encaminhar a água entre os componentes do circuito hidráulico.	AIChE	0,57 [0,0099 ; 2,20]	5,70E-07
CO1	Receber e processar sinais de sensores e emitir os sinais para a atuação do sistema.	AIChE	68,8 [2,43 ; 260,0]	6,88E-05
EV1	Resfriar a água.	AIChE	9,09 [1,75 ; 24,7]	9,09E-06
MG1	Encaminhar a água entre os componentes do circuito hidráulico.	AIChE	0,5 [0,0099 ; 2,20]	5,00E-07
MO1	Transformar energia elétrica em energia mecânica, proporcionando o acionamento da bomba.	AIChE	15,20 [0,0222 ; 46,70]	1,52E-05
SA1	Emitir sinal sonoro mediante um estímulo elétrico.	AIChE	0,77 [0,0272 ; 2,90]	7,70E-07
SL1	Emitir sinal luminoso mediante um estímulo elétrico.	AIChE	25,10 [0,436 ; 97,10]	2,51E-05
ST1	Detectar a temperatura e transmitir sinal para o controlador.	AIChE	97,0 [1,68 ; 375,0]	9,70E-05
TB1	Encaminhar a água entre os componentes do circuito hidráulico.	AIChE	1,52E-5/m [2,64E-7 ; 5,91E-5]/m	1,52E-11
TC1	Resfriar a água.	AIChE	31,10 [0,0173 ; 131,0]	3,11E-05
VA1	Controlar a passagem da água (permitindo ou restringindo), conforme o acionamento do atuador (homem ou equipamento).	AIChE	0,152 [0,0141 ; 0,501]	1,52E-07
VC1	Receber o sinal do sistema de controle e regular a passagem da água (permitindo ou restringindo) por meio da conversão de energia elétrica em energia mecânica.	AIChE	1,36 [0,239 ; 3,80]	1,36E-06
VC2	Receber o sinal do sistema de controle e regular a passagem da água (permitindo ou restringindo) por meio da conversão de energia elétrica em energia mecânica.	AIChE	48,70 [0,679 ; 189,0]	4,87E-05
VC3	Receber o sinal do sistema de controle e regular a passagem da água (permitindo ou restringindo) por meio da conversão da energia no fluido (ar) em energia mecânica.	AIChE	3,59 [0,274 ; 12,30]	3,59E-06
VP1	Conter a água.	AIChE	1,21 [0,021 ; 4,68]	1,21E-06

(*) AIChE: American Institute of Chemical Engineers (1989); e DNV: Det Norske Veritas (2009).

(**) As taxas médias e os intervalos de confiança de 90% foram apresentados nas respectivas referências.

3.2.2.4 Etapa 5 – Funções humanas

Nesta etapa, o desenvolvimento do modelo de confiabilidade humana idealmente considerará um modelo genérico, conforme proposta para a Etapa 5 da metodologia. Um modelo com estas características será apresentado no Capítulo 6, após a apresentação da TECHR. Para esta demonstração das etapas da metodologia, serão utilizados diretamente os dados apresentados em Swain e Guttman (1983) como uma aproximação inicial para as probabilidades de falha humana (HEP), somente para as atividades presentes na Tab. 16, conforme apresentados na Fig. 22. No desenvolvimento da última coluna da Tab. 16 considerou-se uma ação do operador no período de uma hora – i.e., considerou-se a oportunidade de erro em uma hora (isto porque, para este exemplo, o critério de aprovação, discutido na seção 3.2.2.5, refere-se a uma hora de operação). Ademais, nesta tabela, EF (*Error Factor*) refere-se à medida de incerteza na determinação da HEP, conforme apresentada por Swain e Guttman (1983).

Tab. 16 – Lista de funções humanas

Código	Funções	Dados de Confiabilidade	
		HEP, EF (Dist. Lognormal)	P(Falha em 1 hora)
HE1	Monitoração de mostrador	0,003;3	4,00E-3
HE2	Comparação de dados numéricos	0,001, 3	1,00E-3
HE3	Tomada de decisão	0,0001, 30	1,00E-4
HE4	Acionamento de válvulas	0,0005, 10	5,00E-4
HE5	Seguir procedimentos escritos	0,0005;10	5,00E-4

3.2.2.5 Etapas 6, 7 e 8

Em continuidade ao exemplo, são aplicadas as Etapas 6, 7 e 8 para verificar a existência de uma combinação entre agentes (listados nas Etapas 4 e 5) e atividades (listadas na Etapa 2) que atenda às especificações apresentadas na Etapa 1 desta metodologia, i.e., as Etapas 6, 7 e 8 são aplicadas ciclicamente, com base nos dados apresentados nas Etapas 2, 4 e 5, a fim de encontrar uma combinação que atenda aos requisitos pré-estabelecidos na Etapa 1.

3.2.2.5.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes

A Etapa 6 consiste no levantamento dos possíveis agentes para uma determinada atividade. Assim, por exemplo, para a atividade 1. *Identificar a temperatura do tanque*, conforme apresentada na Fig. 22, podem ser associados os agentes presentes na Tab. 17. A Tab. 17 apresenta quatro possibilidades de agentes para a atividade 1, sendo que duas destas possibilidades envolvem ações humanas.

Tab. 17 – Associação de agentes às atividades requeridas do sistema

Atividade		Agente	
1	Identificar a temperatura do tanque	CC1	Detecção por meio de conjunto
		ST1	Detecção por meio de sensor
		ST1_SAI_HE1	Detecção por meio de sensor, sinal auditivo e monitoração humana
		ST1_SL1_HE1	Detecção por meio de sensor, sinal luminoso e monitoração humana

3.2.2.5.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade

Os dados obtidos na Etapa 6 são utilizados na Etapa 7, que consiste na

avaliação da confiabilidade de cada opção e escolha do agente mais confiável. Esta avaliação pode ser feita por meio da RB apresentada na Fig. 23.

Fig. 23 – RB para a atividade 1. Identificar a temperatura do tanque

Os nós da RB apresentada na Fig. 23 representam equipamentos (laranja), operador (amarelo), atividade (azul) e possíveis agentes (verde). Os nós para equipamentos, operador e atividade apresentam dois estados: “Falha” e “Sucesso”, “Erro” e “Sucesso”, e “Fracasso” e “Sucesso”, respectivamente – procurou-se, ao longo desta tese, utilizar o termo *falha* para equipamentos e sistemas específicos, o termo *erro* para ações humanas, e o termo *fracasso* para as atividades a serem modeladas (realizadas pelo elemento humano ou por equipamentos; e.g. vide a Fig. 22). O nó para possíveis agentes apresenta os quatro estados relativos aos possíveis agentes listados na Tab. 17.

As TPC para os nós para equipamentos e operador foram preenchidas com os dados apresentados na Tab. 15 e na Tab. 16, respectivamente. O nó para a atividade é determinístico, sendo preenchido de acordo com os estados dos demais nós da rede. Foi considerado o estado “Sucesso” para este nó sempre que a combinação de estados dos demais nós da rede levem ao sucesso na atividade. A Tab. 18 apresenta uma parte da TPC para este nó. Se for considerada a evidência de qualquer dos estados apresentados no nó “A1” da RB da Fig. 23, a probabilidade do estado “Fracasso” para o nó “1.Identificar a temperatura do tanque” é igual ao complementar da confiabilidade associada à execução da atividade referente a este nó, em uma hora de operação, como apresentada na Tab. 19.

Tab. 18 – TPC para o nó “1.Identificar a temperatura do tanque” (parcial)

<i>AI</i>	<i>CC1</i>	<i>ST1</i>	<i>HE1</i>	<i>SL1</i>	<i>SA1</i>	<i>Atividade 1</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Erro</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Erro</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Erro</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Erro</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Erro</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Erro</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Erro</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Erro</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Falha</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Fracasso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>
<i>ST1 SL1 HE1</i>	<i>Falha</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>

Tab. 19 – P(Fracasso/Agente)

<i>P(Atividade 1=Fracasso/AI)</i>	<i>AI</i>
2,47E-07	<i>CC1</i>
9,70E-07	<i>ST1</i>
4,09E-05	<i>ST1_SAI_HE1</i>
4,12E-05	<i>ST1_SL1_HE1</i>

Segundo os dados apresentados na Tab. 19, o agente que apresenta a melhor confiabilidade é o CC1.

3.2.2.5.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema

Na Etapa 8 da metodologia, considerando que a confiabilidade nas demais ações seja 100%, é possível igualar a confiabilidade do sistema à confiabilidade do agente CC1 (escolhido na Etapa 7). Como descrito na Etapa 1, o sistema deve apresentar confiabilidade maior que 90% em sua vida útil. Sendo assim, considerando o procedimento de manutenção anual apresentado na Etapa 1 – e condição *as good as new* (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVITSOVS, 2010) após o procedimento –, o sistema deve apresentar confiabilidade em 1 ano superior a 99,65%. Assumindo que, em função do curto período de operação (máximo de 10 dias), o tempo de falha deste sistema respeite uma distribuição exponencial em sua fase operacional (com taxa de falha constante), conclui-se que sua probabilidade de falha em uma hora de operação deve ser menor que 4,01E-7. Como a confiabilidade

calculada para o sistema (probabilidade de falha igual a $2,47\text{E}-07$) nesta primeira iteração (considerando possibilidade falha apenas na 1ª atividade) é maior que o limite imposto na especificação do sistema (probabilidade de falha igual a $4,01\text{E}-7$), a metodologia propõe a volta à Etapa 6 para o levantamento dos possíveis agentes para a atividade 2. *Comparar com a temperatura de interesse.*

Seguindo o mesmo procedimento realizado para a atividade 1, constata-se que o agente CC1 é o mais adequado para a atividade 2, quando considerada apenas a confiabilidade. A Fig. 24 apresenta a RB utilizada para esta avaliação.

Fig. 24 – RB para a atividade 2. Comparar com a temperatura de interesse

Verifica-se na RB da Fig. 24 que, sendo considerada a evidência de emprego do CC1 tanto na atividade 1 quanto na atividade 2, não há elevação na probabilidade de falha do sistema, já que este é um equipamento de uso contínuo (o modelo não considera falha na demanda para este equipamento). Neste modelo, a probabilidade de falha do sistema é igual à probabilidade de falha na última atividade analisada (considera-se que os agentes para as ações subsequentes apresentam confiabilidade de 100%). Este é o fim deste exemplo de aplicação, tendo sido apresentada apenas a iteração inicial nas etapas cíclicas da metodologia.

3.3 COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO

Com foco na atenuação das limitações derivadas da análise de confiabilidade realizada apenas em fases avançadas do projeto, este capítulo descreveu uma metodologia que considera a confiabilidade quantitativamente ainda na fase de concepção. Para avaliar esta metodologia, foram feitas duas aplicações em casos concretos, apresentadas nos Capítulos 6 e 7. Isto foi feito após a aplicação da TECHR no desenvolvimento de um modelo de desempenho humano que pode ser empregado na Etapa 5 da metodologia – Capítulos 4, 5 e 6 desta tese.

O problema escolhido para a avaliação da metodologia (nos Capítulos 6 e 7) refere-se ao resfriamento de elementos combustíveis (EC) ativados recém removidos de um reator nuclear de fissão do tipo PWR. Neste estudo foi considerada a concepção de um sistema ativo de resfriamento, denominado Sistema de Resfriamento da Piscina de Estocagem de Combustível (SRPEC).

A motivação para o estudo do SRPEC encontra-se em sua importância no que diz respeito à estimativa da CDF (*Core Damage Frequency*) de plantas nucleares de potência na condição de desligamento (ALVAREZ et al., 2003; CHEOK, 1999; COLLINS; HUBBARD, 2001). A CDF é uma medida de risco que permite comparar plantas diferentes e o risco associado às diversas fases e modos operacionais de uma mesma planta. Considera-se que qualquer evento que possa levar dano ao elemento combustível – mais especificamente, a exposição do combustível ao fluido refrigerante ou ao meio externo à vareta de combustível (LAMARSH; BARATTA, 2001) – contribua para a CDF. Sendo assim, considera-se que há dano sempre que o elemento fica descoberto (após sua ativação). Ressalte-se que, apesar do termo CDF referir-se ao núcleo do reator, os eventos que contribuem para a frequência não se limitam a ocorrências internas ao vaso do reator, desde que se refiram a alguma fase operacional do reator, como o desligamento, por exemplo.

O cálculo da CDF é apresentado na APS da planta nuclear, sendo parte essencial da documentação para o seu licenciamento – antes do comissionamento, o operador demonstra que a CDF apresenta-se abaixo do limite estabelecido pelo órgão regulador; esta informação também é requisitada na fase operacional, para o caso de modificação no projeto da planta (USNRC, 2014).

4 TECHNIQUE FOR EARLY CONSIDERATION OF HUMAN RELIABILITY (TECHR)

O conhecimento da confiabilidade humana é fundamental para o desenvolvimento de modelos preditivos e/ou retrospectivos baseados na quantificação do desempenho de sistemas que envolvam o elemento humano (CARNINO, 1985; BORING, 2007; KENNEDY et al., 2007; DE LA GARZA; LABARTHE; GRAGLIA, 2012). Estas informações, nem sempre disponíveis, são extensivamente requeridas em análises de desempenho e em análises de risco (ABO; MAGED; RAOUF, 1979; PAPIN, 2011). A confiabilidade humana associada a uma ação é a probabilidade de uma pessoa (SWAIN; GUTTMANN, 1983): 1) executar corretamente a ação, no tempo requerido (caso o tempo seja importante); e 2) não realizar qualquer atividade que degrade o sistema. A HEP associada a uma ação é o complementar da confiabilidade humana associada à mesma ação. Assim, quaisquer eventos com origem – ou ausências de eventos que deveriam ter origem – na pessoa responsável pela ação e que impeçam a execução correta desta ação (no tempo requerido) ou que levem a ações que degradem o sistema, são erros humanos e contribuem para a HEP associada à ação.

Dada a execução errônea de uma ação, a identificação do tipo de erro que levou ao evento indesejado pode não ser trivial, exigindo, por exemplo, a participação do próprio executor da ação (e.g., abordado em entrevista) e a consideração de fatores humanos ainda não conhecidos plenamente (e.g., cognição humana) (GREENBERG et al., 2012; HOLLNAGEL, 1998). Estas dificuldades contribuem para que a quantificação seja feita pela associação da HEP diretamente à ação, i.e., não se quantificam os possíveis tipos de erro que podem ocorrer na ação. Esta é uma atitude compreensível, já que os dados coletados referem-se ao número de ações errôneas e ao número de ações observadas, e que, em uma visão clássica de probabilidade (EFRON, 2005), a HEP pode ser aproximada pela relação entre estes números ($HEP = n^{\circ} \text{ ações errôneas} / \text{total de ações}$) (SWAIN; GUTTMANN, 1983).

Com o passar dos anos, a necessidade de avaliar o desempenho humano resultou no desenvolvimento de diversas técnicas dedicadas à ACH – suas características, contexto de desenvolvimento e limitações foram discutidos na seção

2.1 e em trabalhos anteriores (MARTINS; MATURANA, 2009a, 2009b, 2013; MATURANA, 2010) e reconsiderados, no contexto deste trabalho, no Capítulo 5, conforme descrição mais adiante. Neste ponto, no entanto, é interessante ressaltar que, como comumente apresentados, os dados de desempenho humano são aplicáveis diretamente apenas às ações muito semelhantes àsquelas que deram origem aos dados quantitativos (GREENBERG et al., 2012). Desta forma, quando são necessários dados de desempenho humano em um contexto de projeto ou na análise de sistemas inovadores – onde estão presentes ações humanas ainda não estudadas empiricamente – esta limitação na apresentação contribui para que as informações quantitativas relevantes presentes nos diversos estudos de confiabilidade humana sejam desconsideradas. Além disto, a associação de dados de ações semelhantes induz a inserção de incertezas que podem ser significativas (MARTINS; MATURANA, 2010). Assim, para sistemas inovadores, é mais adequado que estejam disponíveis as probabilidades dos diversos tipos de erro humano, permitindo que, pela combinação destes dados, seja associada à ação humana uma estimativa inicial de HEP direcionada ao caso específico do novo sistema.

A metodologia apresentada no Capítulo 3 (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015), por exemplo, explicita a necessidade de informação na forma citada no parágrafo anterior, quando se deseja a consideração precoce da confiabilidade humana na concepção de sistemas complexos. A *Etapa 5: Funções Humanas* desta metodologia trata do desenvolvimento de um modelo prospectivo para o elemento humano focado na área de aplicação de um sistema em concepção. Com o propósito de auxiliar nesta etapa, aproveitando a informação disponível em diversas técnicas de ACH e APS publicadas – e.g., USNRC (1975) – na elaboração de um modelo prospectivo do desempenho humano, foi desenvolvida a TECHR (*Technique for Early Consideration of Human Reliability*) (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015), constituindo-se em uma técnica para a consideração precoce da confiabilidade humana que, por meio da combinação de estimativas das probabilidades de diversos tipos de erro humano, permite a estimativa da HEP a priori de ações ainda não quantificadas empiricamente. Ademais, aos dados quantitativos e aos modelos obtidos pela TECHR foram associados dados de incerteza (intervalos de confiança de 90%) que são úteis em etapas posteriores da metodologia apresentada no Capítulo 3.

Os modelos apresentados neste trabalho foram desenvolvidos em RB. Isto porque, além de seu emprego na metodologia apresentada no capítulo anterior, as RB permitem a representação da combinação de dados estatísticos, a consideração de dependências e o uso direto do modelo na atualização bayesiana de dados (CHARNIAK, 1991; RUSSEL; NORVIG, 2003; PEARL, 1988) – vide a seção 2.2.

A TECHR está sendo apresentada neste capítulo e nos Capítulos 5 e 6, e seu emprego no contexto da concepção de sistemas será exposto nos Capítulos 7 e 8 – a apresentação da técnica em três partes se justifica pela diversidade dos temas discutidos e pela facilidade de entendimento daquilo que está sendo exposto em cada parte.

A primeira parte deste capítulo desenvolve o equacionamento a ser utilizado para as estimativas a priori e atualizada da probabilidade dos tipos de erro humano, dadas as HEP associadas a um grupo específico de ações humanas. A segunda parte deste capítulo quantifica de forma simplificada a probabilidade de um dos tipos de erro da taxonomia de Reason (1990), tomando como base apenas algumas ações com HEP publicadas – esta segunda parte também apresenta a RB modelando o caso estudado neste exemplo simples. Ressalte-se que a quantificação das probabilidades dos diferentes tipos de erro propostos por Reason (1990) considerando uma base de dados mais abrangente, o equacionamento para a combinação destas probabilidades e a obtenção de um modelo prospectivo de desempenho humano, são assuntos abordados nos Capítulos 5 e 6.

4.1 QUANTIFICAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DAS PROBABILIDADES DOS TIPOS DE ERRO HUMANO

Os erros humanos podem ser classificados de acordo com seus tipos – e.g., aplicando a taxonomia de Reason (1990) –, e a cada ação humana pode ser associado um grupo de possíveis tipos de erro humano. Como exemplo, a uma ação A podem ser associados os erros do tipo α , do tipo β e do tipo γ . Na associação de uma HEP a esta ação, considera-se a relação entre o número de ações errôneas e o número de ações, sendo que as ações errôneas resultam destes três possíveis tipos de erro. Se cada ação errônea for atribuída a um tipo específico de erro, é possível

encontrar a probabilidade deste tipo de erro pela relação entre o número de erros deste tipo e o número de ações. Em outras palavras, a probabilidade do tipo de erro será uma fração da HEP na ação, i.e., os tipos de erro serão mutuamente exclusivos, dada uma ação.

Assim, conhecida a probabilidade de cada tipo de erro em determinada ação, é possível determinar a HEP nesta ação. De outra forma, conhecida a frequência de ocorrência relativa dos tipos de erro, dada a HEP na ação, é possível determinar a probabilidade de cada tipo de erro na mesma ação. Por exemplo, se na ação *A* o erro tipo α ocorre duas vezes mais que o erro tipo β , e o erro tipo β ocorre duas vezes mais que o erro tipo γ , é possível definir a probabilidade de cada tipo de erro (p_α , p_β , e p_γ), dada a HEP, através da solução do sistema de equações formado pelas Eqs. (54), (55) e (56).

$$p_\alpha + p_\beta + p_\gamma = HEP \quad (54)$$

$$p_\alpha - 2p_\beta = 0 \quad (55)$$

$$p_\beta - 2p_\gamma = 0 \quad (56)$$

Estas relações levam a uma solução exata, onde p_α é igual a $\frac{4}{7}HEP$, p_β é igual a $\frac{2}{7}HEP$ e p_γ é igual a $\frac{1}{7}HEP$.

De forma geral, os dados de desempenho humano disponíveis não permitem discriminar a fração da HEP em uma ação que pode ser atribuída a cada tipo de erro – o Capítulo 5 exemplifica a forma de apresentação dos dados quantitativos disponíveis – e, assim, resultados exatos como os encontrados no exemplo da ação *A* não podem ser alcançados pela aplicação direta destes dados. Nesta condição, no entanto, partindo da Eq. (54) podem ser definidas as combinações $[p_\alpha; p_\beta; p_\gamma]$ de possíveis valores para as probabilidades dos três tipos de erro.

Supondo, por exemplo, que a HEP seja igual a 0,4 e que os valores para p_α , p_β e p_γ pertençam aos conjuntos de variáveis aleatórias discretas apresentados na Eq. (57), é possível encontrar 15 combinações das probabilidades p_i dos três tipos de erro que respeitam as limitações apresentadas na Eq. (54), conforme Tab. 20.

$$p_\alpha, p_\beta, p_\gamma \in P_i = \{0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4\} \quad (57)$$

Não há evidência sobre a representatividade de cada combinação, i.e., a atribuição de 0,4 para a HEP da ação A não fornece qualquer informação sobre a contribuição relativa entre a combinação [0,1; 0; 0,3] e a combinação [0,1; 0,2; 0,1], por exemplo, na composição da HEP. Sendo assim, é razoável supor que cada possível combinação seja uma solução igualmente provável para a Eq. (54).

Tab. 20 – Possíveis combinações

$[p_\alpha; p_\beta; p_\gamma]$		
[0; 0; 0,4]	[0,1; 0; 0,3]	[0,2; 0,1; 0,1]
[0; 0,1; 0,3]	[0,1; 0,1; 0,2]	[0,2; 0,2; 0]
[0; 0,2; 0,2]	[0,1; 0,2; 0,1]	[0,3; 0; 0,1]
[0; 0,3; 0,1]	[0,1; 0,3; 0]	[0,3; 0,1; 0]
[0; 0,4; 0]	[0,2; 0; 0,2]	[0,4; 0; 0]

A representatividade de cada combinação é uma medida de sua ocorrência. Desta forma, é possível determinar a representatividade relativa das probabilidades para cada tipo de erro. Como exemplo, para o erro do tipo α , considerando as combinações apresentadas na Tab. 20, a representatividade dos possíveis valores para a probabilidade p_α são apresentadas na Tab. 21.

Tab. 21 – Obtenção de p_α

p_α	Nº de ocorrências	Representatividade relativa
0	5	$5/15 = 3,33\text{E-}01$
0,1	4	$4/15 = 2,67\text{E-}01$
0,2	3	$3/15 = 2,00\text{E-}01$
0,3	2	$2/15 = 1,33\text{E-}01$
0,4	1	$1/15 = 6,67\text{E-}02$

A distribuição para a representatividade relativa apresentada na Tab. 21 é uma estimativa para a função densidade de probabilidades de P_α , já que não foi apresentada evidência de maior contribuição de um ou de outro tipo de erro para a HEP da ação A. Os resultados para os demais tipos de erro (β e γ) são idênticos ao encontrado para o erro do tipo α . As variabilidades estimadas para as probabilidades destes tipos de erro estão reproduzidas na Fig. 25.

Fig. 25 – Variabilidade para as probabilidades dos tipos de erro α , β e γ

A técnica apresentada neste exemplo pode ser generalizada considerando as hipóteses de incerteza no valor da HEP, de que a ação humana esteja sujeita a l tipos distintos de erros, e/ou de associação do mesmo tipo de erro a diversas ações. Neste sentido, os próximos itens trazem: 1) a obtenção de uma função de probabilidades discreta para os l possíveis tipos de erro associados a uma ação, dada a HEP correspondente; 2) a derivação de uma função densidade de probabilidades contínua para estes mesmos l tipos de erro, dada a HEP correspondente; 3) obtenção de uma função de probabilidades para os l tipos de erro, dada uma ação em que haja incerteza no valor da HEP; e 4) obtenção da variabilidade populacional a priori para a probabilidade de um tipo de erro associado a diversas ações, e obtenção de um modelo para sua atualização mediante evidências.

4.1.1 Função de probabilidades para l tipos de erro

Em muitos casos, mesmo que os l tipos de erro que sujeitam a ação sejam conhecidos, existe dúvida em relação ao valor da HEP a ser associada a uma ação. Para o caso discreto, os $n+1$ possíveis valores podem ser representados pelo conjunto apresentado na Eq. (58).

$$HEP = \{hep_0, hep_1, hep_2, hep_3, \dots, hep_m, \dots, hep_n\} \quad (58)$$

Para cada hep_m apresentada na Eq. (58) existe um conjunto de possíveis combinações de valores para as probabilidades P_i dos l tipos de erro que sujeitam a ação. Como os tipos de erro que podem ocorrer na ação estão sendo considerados mutuamente exclusivos, são possíveis as combinações que respeitam a Eq. (59).

$$hep_m = \sum_{i=1}^l P_i \quad (59)$$

Inicialmente, tomando como referência a hep_m , o conjunto apresentado na Eq. (60) pode ser adotado como o conjunto das $k+1$ possíveis probabilidades de um tipo de erro i ocorrer na ação.

$$P_i = \{p_{i,0}, p_{i,1}, p_{i,2}, p_{i,3}, \dots, p_{i,q}, \dots, p_{i,k}\} \text{ para } q=0,1,2,\dots,k \quad (60)$$

Neste conjunto, o valor de cada elemento pode ser calculado considerando $p_{i,0}$ igual a 0 e $p_{i,k}$ igual a hep_m , e intercalando os elementos intermediários no intervalo $[0, hep_m]$, em função da Eq. (61) e do índice q apresentado na Eq. (60), conforme a Eq. (62).

$$\Delta_p = \frac{hep_m}{k}, \text{ para } k = \{k \in \mathbb{N}; k > 0\} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} p_{i,0} &= 0; \\ p_{i,1} &= \Delta_p; \\ &\vdots \\ p_{i,q} &= q\Delta_p; \\ &\vdots \\ p_{i,k} &= k\Delta_p = hep_m \end{aligned} \quad (62)$$

Assim, dados k e l , o número total de possíveis combinações $NTC_{k,l}$ das probabilidades dos l tipos de erro que respeitam a Eq. (59) pode ser obtido pela Eq. (63), eduzida da observação de vários exemplos – vide a Tab. 20 como exemplo para $l=3$ e $k=4$, onde são encontradas 15 possíveis combinações, i.e., $NTC_{4,3}=15$.

$$NTC_{k,l} = \sum_{x_l=0}^k \sum_{x_{l-1}=0}^{k-x_l} \dots \sum_{x_i=0}^{k-\sum_{j=i+1}^l x_j} \dots \sum_{x_3=0}^{k-\sum_{j=4}^l x_j} \sum_{x_2=0}^{k-\sum_{j=3}^l x_j} 1 \quad (63)$$

Nesta equação, as variáveis x_i e j são os índices dos somatórios.

A Eq. (63) foi aplicada a diversas combinações de k e l , sendo obtidos os resultados apresentados na Tab. 22.

Tab. 22 – Número de possíveis combinações

NTC_{kl}		k										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipos de Erro (l)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	3	1	3	6	10	15	21	28	36	45	55	66
	4	1	4	10	20	35	56	84	120	165	220	286
	5	1	5	15	35	70	126	210	330	495	715	1001
	6	1	6	21	56	126	252	462	792	1287	2002	3003
	7	1	7	28	84	210	462	924	1716	3003	5005	8008
	8	1	8	36	120	330	792	1716	3432	6435	11440	19448
	9	1	9	45	165	495	1287	3003	6435	12870	24310	43758
	10	1	10	55	220	715	2002	5005	11440	24310	48620	92378

A Tab. 22 remete ao triângulo de Pascal (KADANE, 2011) – exemplificado pelos valores entre a primeira linha, a primeira coluna, e a diagonal que une k e $l=k+1$ (na Tab. 22, os valores para a diagonal quando k é igual a 6 foram deixados hachurados, sendo que o respectivo triângulo de Pascal foi contornado em vermelho). Sendo assim, o número total de possíveis combinações $NTC_{k,l}$ de cada célula pode ser obtido pelo coeficiente binomial apresentado na Eq. (64).

$$NTC_{k,l} = \binom{l+k-1}{k} = \frac{(l+k-1)!}{(k)!(l-1)!} \quad (64)$$

Para determinado tipo de erro i , o número de combinações $NC_{q,k,l}$ possíveis em que a probabilidade $p_{i,q}$ ocorre pode ser obtido pela Eq. (65). Esta equação foi eduzida da observação de vários exemplos.

$$NC_{q,k,l} = \sum_{x_{l-1}=0}^{k-q} \dots \sum_{x_i=0}^{k-\sum_{j=i+1}^l x_j} \dots \sum_{x_3=0}^{k-\sum_{j=4}^l x_j} \sum_{x_2=0}^{k-\sum_{j=3}^l x_j} 1 \quad (65)$$

Nesta equação, as variáveis x_i e j são os índices dos somatórios. Além disto, os possíveis valores para q estão apresentados no intervalo expresso na Eq. (66).

$$q = \{q \in \mathbb{N}; q \leq k\} \quad (66)$$

Para uma combinação específica de k e l , que gera o $NTC_{k,l}$ apresentado na coluna k e linha l da Tab. 22, por exemplo, os $NC_{q,k,l}$ calculados por meio da Eq. (65) estão apresentados na linha imediatamente superior ($l-1$), entre a primeira coluna e a coluna k desta tabela (incluindo estas colunas). Assim, na Tab. 22, o $NC_{q,k,l}$ está apresentado na coluna $k-q$ da linha $l-1$.

Aproveitando a solução do triângulo de Pascal, o $NC_{q,k,l}$ pode ser obtido pelo coeficiente binomial apresentado na Eq. (67).

$$NC_{q,k,l} = \binom{l+k-q-2}{k-q} = \frac{(l+k-q-2)!}{(k-q)!(l-2)!} \quad (67)$$

Assim, a função de probabilidades de P_i , dados k e l , de um ponto de vista frequentista (EFRON, 2005), pode ser aproximada conforme a Eq. (68).

$$P(p_{i,q}|k, l) = \frac{NC_{q,k,l}}{NTC_{k,l}} \quad (68)$$

As variáveis nesta equação foram substituídas pelos resultados apresentados nas Eqs. (64) e (67), sendo obtida a Eq. (69).

$$P(p_{i,q}|k, l) = \frac{\binom{l+k-q-2}{k-q}}{\binom{l+k-1}{k}} = \frac{\frac{(l+k-q-2)!}{(k-q)!(l-2)!}}{\frac{(l+k-1)!}{(k)!(l-1)!}} \quad (69)$$

Esta equação pode ser simplificada para a obtenção da Eq. (70).

$$P(p_{i,q}|k, l) = \frac{(l-1)}{(k-q)} \frac{k(k-1) \dots (k-q)}{[(l-1)+k][(l-1)+(k-1)] \dots [(l-1)+(k-q)]} \quad (70)$$

O segundo fator do membro direito da Eq. (70) pode ser reescrito, conforme a Eq. (71).

$$\frac{k(k-1) \dots (k-q)}{[(l-1)+k][(l-1)+(k-1)] \dots [(l-1)+(k-q)]} = \prod_{j=0}^{j=l-2} \frac{k-(q-l+2+j)}{k-(1-l+j)} \quad (71)$$

Considerando o definido nas Eqs. (61) e (62), as variáveis k e q da Eq. (71) podem ser substituídas pelas relações apresentadas nas Eqs. (72) e (73).

$$k = \frac{hep_m}{\Delta_p} \quad (72)$$

$$q = \frac{p_{iq}}{\Delta_p} \quad (73)$$

Assim, o membro direito da Eq. (71) pode ser reescrito, conforme a Eq. (74).

$$\begin{aligned}
\prod_{j=0}^{j=l-2} \frac{k - (q - l + 2 + j)}{k - (1 - l + j)} &= \prod_{j=0}^{j=l-2} \frac{\frac{hep_m}{\Delta_p} - (\frac{p_{i,q}}{\Delta_p} - l + 2 + j)}{\frac{hep_m}{\Delta_p} - (1 - l + j)} \\
&= \prod_{j=0}^{j=l-2} \frac{hep_m - (p_{i,q} - l\Delta_p + 2\Delta_p + j\Delta_p)}{hep_m - (\Delta_p - l\Delta_p + j\Delta_p)}
\end{aligned} \tag{74}$$

Logo, a Eq. (68) pode ser reescrita na forma da Eq. (75), agora para a probabilidade de $p_{i,q}$ dependente de hep_m , l e Δ_p – definido na Eq. (61).

$$\begin{aligned}
P(p_{i,q}|k, l) &= P(p_{i,q}|hep_m, \Delta_p, l) \\
&= \Delta_p \frac{(l-1)}{(hep_m - p_{i,q})} \prod_{j=0}^{j=l-2} \frac{hep_m - (p_{i,q} - l\Delta_p + 2\Delta_p + j\Delta_p)}{hep_m - (\Delta_p - l\Delta_p + j\Delta_p)}
\end{aligned} \tag{75}$$

4.1.2 Função densidade de probabilidades contínua para l tipos de erro

Partindo das equações presentes na subseção anterior, podem ser derivadas funções densidade de probabilidade contínuas para os l tipos de erro que podem ocorrer na execução de determinada ação. Para tanto, considera-se a probabilidade $P(p_{i,q}|hep_m, \Delta_p, l)$, obtida na Eq. (75). Quando Δ_p tende a zero, os fatores do produto da Eq. (75) tendem a $\frac{hep_m - p_{i,q}}{hep_m}$, conforme a Eq. (76).

$$\lim_{\Delta_p \rightarrow 0} \left(\frac{hep_m - (p_{i,q} - l\Delta_p + 2\Delta_p + j\Delta_p)}{hep_m - (\Delta_p - l\Delta_p + j\Delta_p)} \right) = \frac{hep_m - p_{i,q}}{hep_m} \tag{76}$$

Assim, para Δ_p pequeno, a Eq. (75) pode ser reescrita na forma da Eq. (77).

$$P(p_{i,q}|hep_m, \Delta_p, l) = \Delta_p \frac{(l-1)}{(hep_m - p_{i,q})} \left(\frac{hep_m - p_{i,q}}{hep_m} \right)^{l-1} \tag{77}$$

Considerando Δ_p infinitesimal, a função densidade de probabilidade para p_i pode ser derivada da função de probabilidade para $p_{i,q}$, conforme a Eq. (78), sendo obtida a Eq. (79).

$$P(p_i | hep_m, \Delta_p, l) = fdp(p_i | hep_m, \Delta_p, l) \Delta_p \quad (78)$$

$$fdp(p_i | hep_m, \Delta_p, l) = \frac{P(p_i | hep_m, \Delta_p, l)}{\Delta_p} = \frac{(l-1)}{(hep_m - p_i)} \left(\frac{hep_m - p_i}{hep_m} \right)^{l-1} \quad (79)$$

Assim, a função densidade de probabilidade de p_i para o erro tipo i fica definida na Eq. (80).

$$fdp(p_i | hep_m, l) = \begin{cases} \frac{(l-1)}{(hep_m - p_i)} \left(\frac{hep_m - p_i}{hep_m} \right)^{l-1}, & 0 \leq p_i < hep_m \\ 0 & , hep_m \leq p_i \leq 1 \end{cases} \quad (80)$$

A função acima é adotada para as restrições apresentadas na Eq. (81).

$$\begin{aligned} hep_m &= \{hep_m \in \mathbb{R}; 0 < hep_m \leq 1\} \\ l &= \{l \in \mathbb{N}; l \geq 2\} \end{aligned} \quad (81)$$

Para o caso de l ser igual a 1, a função densidade de probabilidade de p_i para o erro tipo i fica definida na Eq. (82), sendo uma distribuição delta de Dirac centrada em hep_m .

$$fdp(p_i | hep_m, l = 1) = \begin{cases} \infty, & p_i = hep_m \\ 0, & p_i \neq hep_m \end{cases} \quad (82)$$

4.1.3 Função densidade de probabilidades para l tipos de erro e incerteza na HEP

De forma geral, os dados de desempenho humano disponíveis na literatura apresentam características distribuídas, refletindo incertezas epistemológicas e a variabilidade do desempenho humano – o Capítulo 5 retoma esta questão em mais detalhes. Esta subseção trata da obtenção da função densidade de probabilidades para os l tipos de erro que podem ocorrer em uma ação à qual está associada uma função de probabilidades discreta para a respectiva HEP.

Tomando os $n+1$ possíveis valores para a variável aleatória HEP, conforme o conjunto apresentado na Eq. (58), sendo hep_0 igual a 0, hep_n igual a 1, e os demais elementos iguais a m/n , considerando para este fim os índices m e n apresentados na Eq. (58), define-se a variável Δ_{hep} , conforme calculada na Eq. (83).

$$\Delta_{hep} = \frac{hep_m}{m} = \frac{hep_n}{n} = \frac{1}{n}, \text{ para } n, m = \{n, m \in \mathbb{N}; n, m > 0\} \quad (83)$$

De outra forma, Δ_{hep} pode ser calculada conforme a Eq. (84).

$$\Delta_{hep} = hep_m - hep_{m-1} \quad (84)$$

Retomando as Eqs. (61) e (83) e igualando Δ_{hep} e Δ_p , obtêm-se as relações apresentadas na Eq. (85).

$$\Delta_p = \frac{hep_m}{k} = \frac{hep_m}{m} = \Delta_{hep} \quad (85)$$

Neste caso, para cada hep_m , k pode ser igualado a m , conforme os índices definidos, respectivamente, nas Eqs. (60) e (58). Assim, a Eq. (68), pode ser reescrita conforme a Eq. (86), sendo $P(p_{i,q}|m, l)$ associada a hep_m :

$$P(p_{i,q}|m, l) = \frac{NC_{q,m,l}}{NTC_{m,l}} \quad (86)$$

Assim, cada possível hep_m determina uma probabilidade única para $p_{i,q}$. A obtenção de uma função que seja independente de hep_m é dada pela combinação das $n+1$ funções obtidas pela aplicação da Eq. (86). Assim, empregando a função de probabilidades das HEP – sendo as HEP determinadas na Eq. (58) e no primeiro parágrafo desta subseção –, a probabilidade de $p_{i,q}$ independente de hep_m é determinada pela Eq. (87), válida para a restrição apresentada na Eq. (88).

$$P(p_{i,q}|l) = \sum_{m=0}^{m=n} P(hep_m) P(p_{i,q}|m, l) \quad (87)$$

$$\begin{aligned} q &= \{q \in \mathbb{N}; q \leq m\} \\ l &= \{l \in \mathbb{N}; l \geq 1\} \end{aligned} \quad (88)$$

4.1.4 Variabilidade para a probabilidade de um tipo de erro e sua atualização

Um mesmo tipo i de erro pode ser associado a diversas ações, de modo que a aplicação do equacionamento proposto nos itens precedentes pode gerar $n(\Phi)$ diferentes estimativas $P_\varphi(p_i|l)$ para a função de probabilidades de p_i – vide Eq. (87). Por meio da combinação destes resultados é possível encontrar uma estimativa para a variabilidade populacional $\phi(p_i)$ da probabilidade p_i . Isto pode ser feito considerando cada estimativa $P_\varphi(p_i|l)$ como a variabilidade $\phi_\varphi(p_i)$ da probabilidade p_i na subpopulação φ (estrato da população representada pelo conjunto Φ), conforme a Eq. (89). Assim, os executores de cada ação são considerados uma subpopulação que permite estimar $\phi(p_i)$.

$$\phi_\varphi(p_i) = P_\varphi(p_i|l) \quad (89)$$

Considerando a probabilidade $P(\varphi)$ de cada subpopulação φ representar a população, e Φ o grupo de subpopulações (assim, Φ é o domínio de φ), a Eq. (90) pode ser aplicada na obtenção da variabilidade populacional da probabilidade p_i .

$$\phi(p_i) = \sum_{\varphi} \phi_\varphi(p_i)P(\varphi) \quad (90)$$

A probabilidade $P(\varphi)$ pode ser atualizada, mediante uma evidência E , pela aplicação do Teorema de Bayes (KADANE, 2011), sendo obtida $P(\varphi|E)$. Para a obtenção de $P(\varphi|E)$, parte-se do cálculo da probabilidade $P(p_i, E, \varphi)$, i.e., da probabilidade da observação conjunta de: 1) p_i é a probabilidade do tipo i de erro; 2) evidência E ; e 3) subpopulação φ representa a população como um todo. E assim, aplicando os mesmos conceitos utilizados para a obtenção da Eq. (46) – utilizada no segundo método para a combinação e atualização de dados (vide a subseção 2.3.2) –, pode ser obtida a Eq. (91).

$$P(\varphi|E) = \frac{\left(\int_{P_i} P(E|P_i, \varphi) \phi_\varphi(P_i) dP_i \right) P(\varphi)}{\int_\Phi \left(\int_{P_i} P(E|P_i, \Phi) \phi_\Phi(P_i) dP_i \right) P(\Phi) d\Phi} \quad (91)$$

A fim de obter a atualização da variabilidade populacional $\phi(p_i|E)$, consideram-se as variáveis presentes nas Eqs. (87), (90) e (92) – que apresenta o fator $P(E)$, i.e., o divisor na Eq. (91) –, para definir um universo com as seguintes variáveis aleatórias discretas: P_i) Probabilidade do erro tipo i na população; $P_{i,\varphi}$) Probabilidade do erro tipo i na subpopulação φ – existem tantas variáveis aleatórias deste tipo quantas forem as subpopulações; E) Número e de observações do erro tipo i em relação ao número de oportunidades para a sua ocorrência; HEP_φ) Probabilidade do erro humano na subpopulação φ – existem tantas variáveis aleatórias deste tipo quantas forem as subpopulações; e φ) subpopulação φ representa a população. Uma entrada da conjunção de probabilidades para este universo foi apresentada na Eq. (93), onde está sendo aplicada a regra da cadeia.

$$P(E) = \int_\Phi \left(\int_{P_i} P(E|P_i, \Phi) \phi_\Phi(P_i) dP_i \right) P(\Phi) d\Phi \quad (92)$$

$$P(p_i, e, p_{i\Phi}, hep_\Phi, \varphi) = P(p_i|e, p_{i\Phi}, hep_\Phi, \varphi) P(e|p_{i\Phi}, hep_\Phi, \varphi) \\ * P(p_{i\Phi}|hep_\Phi, \varphi) P(hep_\Phi|\varphi) P(\varphi) \quad (93)$$

Nesta equação as variáveis $p_{i,\varphi}$ e hep_φ estão sendo apresentadas de forma geral (como $p_{i,\Phi}$ e hep_Φ), visto que são consideradas tantas variáveis aleatórias destes tipos quantas forem as subpopulações. Se forem consideradas duas subpopulações (φ_1 e φ_2), por exemplo, a Eq. (93) seria apresentada conforme a Eq. (94).

$$P(p_i, e, p_{i\varphi_1}, p_{i\varphi_2}, hep_{\varphi_1}, hep_{\varphi_2}, \varphi) \\ = P(p_i|e, p_{i\varphi_1}, p_{i\varphi_2}, hep_{\varphi_1}, hep_{\varphi_2}, \varphi) P(e|p_{i\varphi_1}, p_{i\varphi_2}, hep_{\varphi_1}, hep_{\varphi_2}, \varphi) \\ * P(p_{i\varphi_1}|p_{i\varphi_2}, hep_{\varphi_1}, hep_{\varphi_2}, \varphi) P(p_{i\varphi_2}|hep_{\varphi_1}, hep_{\varphi_2}, \varphi) \quad (94)$$

$$* P(hep_{\varphi_1}|hep_{\varphi_2}, \varphi) P(hep_{\varphi_2}|\varphi) P(\varphi)$$

Observando a definição das variáveis (do universo proposto em parágrafo

anterior) e a Eq. (87), verifica-se que a obtenção de $p_{i,\phi}$ é independente de ϕ . Da mesma forma, observando a Eq. (90), verifica-se que p_i é independente de e e de hep_ϕ . Além de que, observando a Eq. (92), verifica-se que e é independente de hep_ϕ . Como pode ser visto no segundo parágrafo da seção 4.1, as equações desenvolvidas neste capítulo consideram a HEP das ações como dados de entrada. Sendo assim, hep_ϕ é considerada independente de ϕ . Definidas estas relações de independência, a Eq. (93) pode ser simplificada, o que resulta na Eq. (95).

$$P(p_i, e, p_{i,\phi}, hep_\phi, \phi) = P(p_i|p_{i,\phi}, \phi)P(e|p_{i,\phi}, \phi)P(p_{i,\phi}|hep_\phi)P(hep_\phi)P(\phi) \quad (95)$$

Como consequência do Teorema de Bayes, a Eq. (95) pode ser utilizada para o cálculo de $\phi(p_i|E)$ conforme a Eq. (96).

$$\phi(p_i|E = e) = P(p_i|e) = \frac{P(p_i, e)}{P(e)} = \frac{\sum_{P_{i,\phi}, HEP_\phi, \Phi} P(p_i, e, P_{i,\phi}, HEP_\phi, \Phi)}{\sum_{P_i, P_{i,\phi}, HEP_\phi, \Phi} P(P_i, e, P_{i,\phi}, HEP_\phi, \Phi)} \quad (96)$$

Para o caso contínuo, partindo da Eq. (96), considerando $P(p_i|p_{i,\phi}, \phi)$ igual a 1 para p_i igual a $p_{i,\phi}$, e igual a 0, no caso contrário, e utilizando a igualdade presente na Eq. (87), pode-se reescrever a Eq. (96) na forma da Eq. (97).

$$\phi(p_i|e) = \frac{\int_\phi P(e|p_i, \phi)\phi_\phi(p_i)P(\phi)d\phi}{\int_{P_i} \int_\phi P(e|P_i, \phi)\phi_\phi(P_i)P(\phi)d\phi dP_i} \quad (97)$$

4.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação da técnica apresentada na seção anterior, foi estimada a variabilidade populacional da probabilidade do tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais” associado a algumas ações quantificadas na THERP (SWAIN; GUTTMANN, 1983) e apresentadas na Tab. 23 – os resultados obtidos restringem-se ao universo das três ações presentes nesta tabela, doravante citadas pelo código da primeira coluna (vide o Capítulo 5 para mais detalhes sobre a

THERP). Posteriormente, esta estimativa foi atualizada em função de uma evidência hipotética e foi modelada a RB para o universo considerado.

Tab. 23 – Ações com HEP estimadas na THERP (SWAIN; GUTTMANN, 1983)

<i>Tabela da THERP</i>	<i>Descrição da Ação</i>	<i>HEP</i>	<i>EF</i>	μ_y	σ_y
20-10(4)	<i>Ler e recordar informação quantitativa de mostrador não anunciado: informação impressa com grande número de parâmetros.</i>	0,05	5	-3,00	0,98
20-11(3)	<i>Verificação de display: com marcas de limite difíceis de ler (tais como traços anotados).</i>	0,002	3	-6,21	0,67
20-12(5)	<i>Operar controle manual: quando o estereótipo populacional e a condição operacional são normais.</i>	0,005	10	-7,60	1,40

Na THERP, os dados apresentados referem-se à mediana de uma distribuição lognormal (HEP) e ao fator de erro (EF). Estes dados podem ser convertidos nos parâmetros média μ_y e desvio padrão σ_y da normal associada à distribuição lognormal por meio das Eqs. (98) e (99), respectivamente – esta conversão foi necessária para facilitar o trabalho com o NeticaTM, programa utilizado para gerar a RB apresentada na subseção 4.2.2.

$$\mu_y = \ln HEP \quad (98)$$

$$\sigma_y = -\frac{\ln EF}{u_\alpha} \quad (99)$$

Na Eq. (99), a variável u_α refere-se ao valor da abscissa da distribuição normal padrão para o qual a função acumulada é igual a 5%, i.e., -1,64. Assim, os valores de ν e τ também estão apresentados na Tab. 23.

Como apontado no Capítulo 5, considera-se um grupo restrito de tipos de erro para cada nível de desempenho no modelo de ação humana de Rasmussen (RASMUSSEN, 1983). Assim, por conveniência, todas as ações escolhidas para este exemplo podem ser classificadas no nível de regra. Com base na taxonomia de Reason (1990), os tipos de erros que podem ocorrer neste nível de desempenho estão identificados e descritos brevemente na Tab. 24.

Além de ocorrerem no nível de regra, os tipos de erro quantificados na THERP para as ações listadas na Tab. 23 são erros de comissão. Assim, considerando as especificidades de cada ação, os tipos de erro que podem ser associados estão apresentados na Tab. 25. Estes tipos de erro foram levantados com base nas descrições das ações presentes na THERP (SWAIN; GUTTMANN,

1983) e na taxonomia de Reason (1990) para o erro humano.

Tab. 24 – Tipos de erro para o desempenho no nível de regra (REASON, 1990)

<i>Tipo de Erro</i>		<i>Características e Descrição</i>
Primeiras exceções		• O indivíduo não aprendeu a regra correta para a solução de um problema e crê na adequação de uma regra geral ou de uma regra parcialmente válida.
Sinais contrários e ausência de sinais		• A regra adequada não é seguida porque os sinais confundem o indivíduo, não permitindo sua identificação.
Sobrecarga de informação		• A grande quantidade de informações impede a consideração de tudo antes de decidir o que fazer (o indivíduo erra na escolha da regra e/ou em sua aplicação).
Força da regra		• Em virtude da repetição no uso de determinada regra (que por isto torna-se forte), o indivíduo tende a empregá-la em detrimento das demais, favorecendo o erro.
Regras gerais		• Por serem mais abrangentes, as regras gerais tendem a ser mais empregadas que regras específicas (e por isto tornam-se fortes), principalmente na ausência de informação, favorecendo o erro.
Redundância		• A informação sempre presente, mesmo não relacionada a uma situação específica, pode influenciar na escolha de uma regra.
Rigidez		• Na resolução de problemas, o indivíduo tende a replicar fórmulas (regras) de sucesso do seu passado, mesmo que soluções mais simples e adequadas estejam disponíveis.
Deficiências de decodificação		• Na execução de uma tarefa o indivíduo não consegue reconhecer todas as condições necessárias para a determinação de como agir.
Ação deficiente: • A contextualização da regra foi aprendida corretamente; • A ação prevista pela regra é inadequada.	Ação errada para a regra	• A regra aplicada é adequada; • A ação é completamente errada.
	Regras não elegantes	• A ação está de acordo com a regra, mas a ação é antiquada porque regras melhores estão disponíveis.
	Regras não aconselháveis	• A regra escolhida leva ao objetivo, mas com consequências indesejadas.

Para a obtenção da variabilidade da probabilidade p dos tipos de erro presentes na Tab. 25, pode ser aplicada a Eq. (90). Para tanto, as funções densidade de probabilidade da HEP das ações presentes na Tab. 23 foram discretizadas nas funções de probabilidades da HEP apresentadas na Tab. 26, sendo que a probabilidade de hep_m estar no intervalo apresentado na tabela é maior que 99,9% – i.e., $F(hep_{20}) > 99,9\%$.

Em continuidade, considerando o número de tipos de erro (l) para cada ação analisada conforme a última linha da Tab. 25, o índice m associado a cada hep_m conforme apresentado na primeira coluna da Tab. 26, e respeitando as relações apresentadas na Eq. (85), a Eq. (86) pode ser aplicada para a obtenção de $P(p_{iq}|m, l)$ para as combinações l , q e m . Os resultados deste processo estão apresentados na Tab. 27 para a ação 20-10(4), na Tab. 28 para a ação 20-11(3), e na Tab. 29 para a ação 20-12(5).

Tab. 25 – Tipos de erro associados às ações da Tab. 23

Tipo de Erro	20-10(4)		20-11(3)		20-12(5)	
	Associado	Justificativa	Associado	Justificativa	Associado	Justificativa
Primeiras exceções	Não	Dados baseados em operadores exaustivamente treinados	Não	Dados baseados em operadores exaustivamente treinados	Não	Dados baseados em operadores exaustivamente treinados
Sinais contrários e ausência de sinais	Sim	Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução	Sim	Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução	Sim	Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução
Sobrecarga de informação	Sim	A ação, por definição, exige a leitura de grande quantidade de informação	Não	A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação	Não	A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação
Força da regra	Não	Apesar de ser possível o operador ignorar o conteúdo por se tratar de uma alteração não crível de estado da planta, a ação refere-se à leitura e memorização da informação, não ao seu julgamento	Sim	O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra mais comum (marcas mais comuns)	Não	Nesta ação é considerada a situação mais comum
Regras gerais	Não	Apesar de ser possível o operador ignorar o conteúdo por se tratar de uma alteração não crível de estado da planta, a ação refere-se à leitura e memorização da informação, não ao seu julgamento	Sim	O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra geral (marcas mais comuns)	Não	Nesta ação é considerada a situação mais geral
Redundância	Sim	O grande número de parâmetros pode ser confundido com outros sinais presentes	Sim	A informação sempre presente pode se referir aos diversos mostradores próximos	Não	Por se tratar de erro de comissão (atuar controle manual), a influência levaria à não atuação (omissão).
Rigidez	Sim	O indivíduo tende a dar mais atenção a dispositivos que mudam com mais frequência que aos relativos a esta ação (focada em dispositivos de segurança)	Sim	O mais fácil entre as marcas difíceis e a regra de sucesso do passado	Não	Por se tratar de erro de comissão (atuar em controle manual), a influência levaria à não atuação (omissão).
Deficiências de decodificação	Sim	Para o tipo de dispositivo considerado nesta ação é necessária a decodificação e interpretação	Não	Não é necessária a decodificação	Não	Não é necessária a decodificação
Ação errada para a regra	Não	Por se tratar de erro de comissão, esta possibilidade é considerada remota	Não	Por se tratar de erro de comissão, esta possibilidade é considerada remota	Sim	O indivíduo inverte a ação por falta de atenção
Regras não elegantes	Não	Por se tratar de erro de comissão, esta possibilidade é considerada remota	Não	Por se tratar de erro de comissão, esta possibilidade é considerada remota	Não	Por se tratar de erro de comissão, esta possibilidade é considerada remota
Regras não aconselháveis	Não	Os dados se limitam a erros de comissão em uma ação simples	Não	Os dados se limitam a erros de comissão em uma ação simples	Não	Os dados se limitam a erros de comissão em uma ação simples
Número 1 de tipos de erro (assinalados com "Sim" nas colunas "Associado")	5		5		2	

Tab. 26 – Funções de probabilidades para as ações da Tab. 23

m	20-10(4)		20-11(3)		20-12(5)	
	hep _m	P(hep _m)	hep _m	P(hep _m)	hep _m	P(hep _m)
0	0	0	0	0	0	0
1	0,025	0,34643	0,0005	0,069346	0,001	0,54932
2	0,05	0,221758	0,001	0,173906	0,002	0,19022
3	0,075	0,135467	0,0015	0,181304	0,003	0,091301
4	0,1	0,0860756	0,002	0,14955	0,004	0,051548
5	0,125	0,0570609	0,0025	0,113444	0,005	0,032138
6	0,15	0,0392414	0,003	0,083363	0,006	0,021437
7	0,175	0,0278321	0,0035	0,060639	0,007	0,015022
8	0,2	0,0202591	0,004	0,0441	0,008	0,010932
9	0,225	0,0150753	0,0045	0,032219	0,009	0,0081977
10	0,25	0,0114323	0,005	0,023703	0,01	0,0062987
11	0,275	0,0088133	0,0055	0,017577	0,011	0,0049386
12	0,3	0,0068928	0,006	0,013144	0,012	0,0039391
13	0,325	0,0054598	0,0065	0,009912	0,013	0,0031884
14	0,35	0,004374	0,007	0,007536	0,014	0,0026139
15	0,375	0,00354	0,0075	0,005775	0,015	0,0021671
16	0,4	0,0028913	0,008	0,004459	0,016	0,0018145
17	0,425	0,0023813	0,0085	0,003468	0,017	0,0015328
18	0,45	0,0019762	0,009	0,002716	0,018	0,0013051
19	0,475	0,0016514	0,0095	0,002141	0,019	0,0011192
20	0,5	0,0013889	0,01	0,001698	0,02	0,0009661

Tab. 27 – $P(p_{iq}|m, l = 5)$ para os erros da ação 20-10(4) em %

		q																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m	p_{hep_m}	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4	0,425	0,45	0,475	0,5
0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,025	88,89	11,11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,05	75,00	22,22	2,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,075	64,00	27,00	8,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,1	55,56	28,44	12,00	3,56	0,44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,125	48,98	28,34	14,51	6,12	1,81	0,23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,15	43,75	27,55	15,94	8,16	3,44	1,02	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,175	39,51	26,47	16,67	9,65	4,94	2,08	0,62	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,2	36,00	25,28	16,94	10,67	6,17	3,16	1,33	0,40	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,225	33,06	24,10	16,93	11,34	7,14	4,13	2,12	0,89	0,26	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,25	30,56	22,96	16,74	11,75	7,87	4,96	2,87	1,47	0,62	0,18	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0,275	28,40	21,88	16,44	11,98	8,42	5,64	3,55	2,05	1,05	0,44	0,13	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,3	26,53	20,87	16,07	12,08	8,80	6,18	4,14	2,61	1,51	0,77	0,33	0,10	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0,325	24,89	19,93	15,67	12,07	9,07	6,61	4,64	3,11	1,96	1,13	0,58	0,24	0,07	0,01	0	0	0	0	0	0	0
14	0,35	23,44	19,06	15,26	12,00	9,24	6,94	5,06	3,56	2,38	1,50	0,87	0,44	0,19	0,06	0,01	0	0	0	0	0	0
15	0,375	22,15	18,25	14,84	11,88	9,34	7,20	5,41	3,94	2,77	1,85	1,17	0,68	0,35	0,15	0,04	0,01	0	0	0	0	0
16	0,4	20,99	17,50	14,42	11,72	9,39	7,38	5,69	4,27	3,11	2,19	1,47	0,92	0,53	0,27	0,12	0,03	0	0	0	0	0
17	0,425	19,94	16,80	14,01	11,54	9,38	7,51	5,91	4,55	3,42	2,49	1,75	1,17	0,74	0,43	0,22	0,09	0,03	0	0	0	0
18	0,45	19,00	16,16	13,61	11,35	9,35	7,60	6,09	4,79	3,69	2,77	2,02	1,42	0,95	0,60	0,35	0,18	0,07	0,02	0	0	0
19	0,475	18,14	15,55	13,22	11,14	9,29	7,65	6,22	4,98	3,92	3,02	2,27	1,65	1,16	0,78	0,49	0,28	0,15	0,06	0,02	0	0
20	0,5	17,36	14,99	12,85	10,93	9,21	7,68	6,32	5,14	4,12	3,24	2,49	1,87	1,37	0,96	0,64	0,40	0,23	0,12	0,05	0,01	0

Tab. 28 – $P(p_{iq}|m, l = 5)$ para os erros da ação 20-11(3) em %

		q																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m	p_{hep_m}	0	0,0005	0,001	0,0015	0,002	0,0025	0,003	0,0035	0,004	0,0045	0,005	0,0055	0,006	0,0065	0,007	0,0075	0,008	0,0085	0,009	0,0095	0,01
0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0005	88,89	11,11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,001	75,00	22,22	2,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,0015	64,00	27,00	8,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,002	55,56	28,44	12,00	3,56	0,44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,0025	48,98	28,34	14,51	6,12	1,81	0,23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,003	43,75	27,55	15,94	8,16	3,44	1,02	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,0035	39,51	26,47	16,67	9,65	4,94	2,08	0,62	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,004	36,00	25,28	16,94	10,67	6,17	3,16	1,33	0,40	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,0045	33,06	24,10	16,93	11,34	7,14	4,13	2,12	0,89	0,26	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,005	30,56	22,96	16,74	11,75	7,87	4,96	2,87	1,47	0,62	0,18	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0,0055	28,40	21,88	16,44	11,98	8,42	5,64	3,55	2,05	1,05	0,44	0,13	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,006	26,53	20,87	16,07	12,08	8,80	6,18	4,14	2,61	1,51	0,77	0,33	0,10	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0,0065	24,89	19,93	15,67	12,07	9,07	6,61	4,64	3,11	1,96	1,13	0,58	0,24	0,07	0,01	0	0	0	0	0	0	0
14	0,007	23,44	19,06	15,26	12,00	9,24	6,94	5,06	3,56	2,38	1,50	0,87	0,44	0,19	0,06	0,01	0	0	0	0	0	0
15	0,0075	22,15	18,25	14,84	11,88	9,34	7,20	5,41	3,94	2,77	1,85	1,17	0,68	0,35	0,15	0,04	0,01	0	0	0	0	0
16	0,008	20,99	17,50	14,42	11,72	9,39	7,38	5,69	4,27	3,11	2,19	1,47	0,92	0,53	0,27	0,12	0,03	0	0	0	0	0
17	0,0085	19,94	16,80	14,01	11,54	9,38	7,51	5,91	4,55	3,42	2,49	1,75	1,17	0,74	0,43	0,22	0,09	0,03	0	0	0	0
18	0,009	19,00	16,16	13,61	11,35	9,35	7,60	6,09	4,79	3,69	2,77	2,02	1,42	0,95	0,60	0,35	0,18	0,07	0,02	0	0	0
19	0,0095	18,14	15,55	13,22	11,14	9,29	7,65	6,22	4,98	3,92	3,02	2,27	1,65	1,16	0,78	0,49	0,28	0,15	0,06	0,02	0	0
20	0,01	17,36	14,99	12,85	10,93	9,21	7,68	6,32	5,14	4,12	3,24	2,49	1,87	1,37	0,96	0,64	0,40	0,23	0,12	0,05	0,01	0

Assim, submetendo estes resultados e os dados apresentados na Tab. 26 à Eq. (87), são obtidas as probabilidades apresentadas na Tab. 30 para as funções de probabilidades de P_i dos tipos de erro relacionados às ações apresentadas na Tab. 23. Ressalte-se que, dada uma ação, não foram consideradas informações de prevalência de um ou de outro tipo de erro – conforme a introdução da seção 4.1. Desta forma, foram obtidas funções de probabilidades idênticas para os tipos de erro associados a uma ação – e.g., na ação 20-12(5), os erros “sinais contrários e

ausência de sinais” e “ação errada para a regra” apresentam a mesma densidade de probabilidade (últimas colunas da Tab. 30).

Tab. 29 – $P(p_{iq}|m, l = 2)$ para os erros da ação 20-12(5) em %

		q																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m	$h_{ep_m}^P$	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,02
0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,001	50,00	50,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,002	33,33	33,33	33,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,003	25,00	25,00	25,00	25,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,004	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,005	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	16,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,006	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,007	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,008	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,009	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,01	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0,011	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,012	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0,013	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	0	0	0	0	0	0	0
14	0,014	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	0	0	0	0	0	0
15	0,015	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	0	0	0	0
16	0,016	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	0	0	0
17	0,017	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	0	0
18	0,018	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	0
19	0,019	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
20	0,02	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76

Tab. 30 – $P(p_i)$ para os tipos de erros nas ações da Tab. 23

20-10 (4)		20-11 (3)		20-12 (5)	
p_i	$P_{10(4)}(p_i)$	p_i	$P_{11(3)}(p_i)$	p_i	$P_{12(6)}(p_i)$
0	6,90E-01	0	5,58E-01	0	3,86E-01
0,025	2,02E-01	0,0005	2,47E-01	0,001	3,86E-01
0,05	6,04E-02	0,001	1,05E-01	0,002	1,11E-01
0,075	2,37E-02	0,0015	4,60E-02	0,003	4,77E-02
0,1	1,09E-02	0,002	2,16E-02	0,004	2,48E-02
0,125	5,56E-03	0,0025	1,08E-02	0,005	1,45E-02
0,15	3,02E-03	0,003	5,62E-03	0,006	9,16E-03
0,175	1,71E-03	0,0035	3,04E-03	0,007	6,10E-03
0,2	9,93E-04	0,004	1,68E-03	0,008	4,22E-03
0,225	5,84E-04	0,0045	9,45E-04	0,009	3,01E-03
0,25	3,44E-04	0,005	5,34E-04	0,01	2,19E-03
0,275	2,01E-04	0,0055	3,00E-04	0,011	1,61E-03
0,3	1,15E-04	0,006	1,66E-04	0,012	1,20E-03
0,325	6,42E-05	0,0065	8,97E-05	0,013	9,00E-04
0,35	3,42E-05	0,007	4,66E-05	0,014	6,72E-04
0,375	1,72E-05	0,0075	2,28E-05	0,015	4,98E-04
0,4	7,90E-06	0,008	1,03E-05	0,016	3,63E-04
0,425	3,20E-06	0,0085	4,07E-06	0,017	2,56E-04
0,45	1,06E-06	0,009	1,32E-06	0,018	1,71E-04
0,475	2,46E-07	0,0095	3,03E-07	0,019	1,02E-04
0,5	2,60E-08	0,01	3,18E-08	0,02	4,60E-05

Desta forma, as funções apresentadas na Tab. 30 são uma estimativa preliminar para a variabilidade da probabilidade p_i dos tipos de erro relacionados a cada ação, conforme a Eq. (89). Para estimar a variabilidade populacional da probabilidade do tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais”, associado às três ações em contexto (ver Tab. 25), a Eq. (90) pode ser aplicada, considerando

cada ação como um estrato φ da população. Como não há justificativa para a prevalência de uma estimativa sobre a outra, inicialmente a função $P(\varphi)$ pode ser considerada uniforme, conforme a Tab. 31.

Tab. 31 – $P(\varphi)$	
φ	$P(\varphi)$
20-10 (4)	0,333
20-11 (3)	0,333
20-12 (5)	0,333

O domínio $\hat{p}_i$ da variabilidade populacional da probabilidade do tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais” será considerado igual ao domínio para a função dos erros relacionados à ação 20-10(4), conforme apresentado na primeira coluna da Tab. 30. Assim, para aplicar a Eq. (87), faz-se necessária a mudança da função de probabilidades de P_i dos erros relacionados às ações 20-11(3) e 20-12(5) para que os domínios sejam correspondentes. Esta alteração pode ser feita por meio da Eq. (100), considerando $\Delta_{\hat{p}_i}$ igual a 0,025 [idêntico ao Δ_{p_i} para a ação 20-10(4)].

$$P(\hat{p}_i) = \sum_{p_i} P(p_i) \quad \forall p_i \in \left\{ \hat{p}_i - \frac{\Delta_{\hat{p}_i}}{2} < p_i \leq \hat{p}_i + \frac{\Delta_{\hat{p}_i}}{2} \right\} \quad (100)$$

Assim, aplicando a Eq. (90), os dados da Tab. 31 e as estimativas da Tab. 30 considerando a mudança de variável conforme a Eq. (100), foi possível estimar a variabilidade populacional $\phi(p_i)$ da probabilidade do tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais”, conforme a Tab. 32.

Tab. 32 – $\phi(p_i)$ para o tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais”

p_i	$\phi(p_i)$	p_i	$\phi(p_i)$
0	8,96E-01	0,275	6,70E-05
0,025	6,84E-02	0,3	3,83E-05
0,05	2,01E-02	0,325	2,14E-05
0,075	7,89E-03	0,35	1,14E-05
0,1	3,64E-03	0,375	5,73E-06
0,125	1,85E-03	0,4	2,63E-06
0,15	1,01E-03	0,425	1,07E-06
0,175	5,70E-04	0,45	3,53E-07
0,2	3,31E-04	0,475	8,20E-08
0,225	1,95E-04	0,5	8,67E-09
0,25	1,15E-04		

4.2.1 Atualização

A atualização da variabilidade da probabilidade apresentada na Tab. 32 pode ser feita por meio da Eq. (97). Para tanto, faz-se necessária a definição de uma função para $P(e|p_{i,\varphi}, \varphi)$. Neste exemplo, será considerada uma distribuição binomial para a evidência de e erros do tipo “sinais contrários e ausência de sinais” em b observações de ações em que este tipo de erro é possível, sendo observada a Eq. (101).

$$P(E = e, b|p_{i,\varphi}, \varphi) = \text{Binomial}(e, b, p_{i,\varphi}) = \binom{b}{e} p_{i,\varphi}^e (1 - p_{i,\varphi})^{b-e} \quad (101)$$

Para o cálculo de $\phi(p_i|e)$ por meio da Eq. (97) são utilizados os valores apresentados na Tab. 30 para $\phi_\varphi(p_i)$ e na Tab. 31 para $P(\varphi)$. Considerando e igual a 3 e b igual a 100, obtém-se a variabilidade populacional atualizada reproduzida na Tab. 33 – e.g., na primeira linha da Tab. 33 é apresentada a soma dos valores da variabilidade para os p_i menores que 0,0125, $\phi(p_i < 0,0125|E)$.

Tab. 33 – $\phi(p_i|E)$ para o erro “sinais contrários e ausência de sinais”

p_i	$\phi(p_i E)$	p_i	$\phi(p_i E)$
0	3,36E-02	0,275	3,46E-13
0,025	7,98E-01	0,3	8,56E-15
0,05	1,52E-01	0,325	1,79E-16
0,075	1,52E-02	0,35	3,07E-18
0,1	1,16E-03	0,375	4,18E-20
0,125	7,51E-05	0,4	4,39E-22
0,15	4,24E-06	0,425	3,33E-24
0,175	2,11E-07	0,45	1,78E-26
0,2	9,22E-09	0,475	3,11E-29
0,225	3,54E-10	0,5	0,00E+00
0,25	1,19E-11		

A Fig. 26 apresenta a variabilidade a priori para o tipo de erro analisado $\phi(p_i)$ e a variabilidade atualizada $\phi(p_i|E)$ no mesmo plano cartesiano. O valor esperado para a probabilidade do tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais” na execução de uma ação antes da evidência citada era 4,34E-03 e, após a evidência, é 2,88E-02.

Ao aplicar a Eq. (91), considerando a mesma evidência (e igual a 3 e b igual a 100) na Eq. (101), além dos dados da Tab. 30, os dados da Tab. 31 podem ser atualizados conforme Tab. 34, i.e., obtém-se $P(\varphi|E = e, b)$.

Fig. 26 – $\phi(p_i)$ e $\phi(p_i|E)$ no mesmo plano cartesiano

Tab. 34 – $P(\varphi|E)$

φ	$P(\varphi E)$
20-10 (4)	0,95975
20-11 (3)	0,00288
20-12 (5)	0,03736

4.2.2 Rede bayesiana para o exemplo

Como exemplo de organização, combinação e atualização de dados, os resultados apresentados nesta seção foram reproduzidos em uma RB – para o mesmo universo do exemplo de aplicação. Assim, consideram-se as mesmas variáveis utilizadas no desenvolvimento da Eq. (95). A Fig. 27 apresenta a topologia para esta rede. Os nós para a RB da Fig. 27 podem ser descritos da seguinte forma:

- **Variáveis do tipo HEP_φ :** estes nós estão em branco na Fig. 27 e seus estados são os possíveis valores de HEP em cada subpopulação φ . As TPC para estes nós foram preenchidas com os dados da Tab. 26. Estes nós foram nomeados em referência à origem de seus dados, conforme a Tab. 23;
- **Variáveis do tipo “Num. Erros: l ”:** estes nós, identificados em amarelo na Fig. 27, são determinísticos e trazem o número de tipos de erro associados a cada ação modelada, conforme a Tab. 25;
- **Variáveis do tipo $P_{i,\varphi}$:** estes nós, também identificados em amarelo na Fig. 27 e pelo título “Erros”, trazem a variabilidade da probabilidade do erro tipo i em uma ação da subpopulação φ – é importante ressaltar que todos os tipos de erro associados a uma ação apresentam a mesma função, as curvas apresentadas na Fig. 27, porém, referem-se ao erro “sinais contrários e ausência de sinais” nas respectivas ações. Os estados para

estes nós são os mesmos que os estados dos nós para as variáveis do tipo HEP_φ , aos quais estão conectados. As TPC para estes nós foram preenchidas de acordo com a Eq. (86), em função de HEP_φ e l , i.e., com os dados das Tab. 27, Tab. 28 e Tab. 29.

- **“Observações” – Número de observações:** este nó, identificado em amarelo na Fig. 27, também é determinístico e traz o número b (100 para o exemplo) de observações de uma ação em que se pretende investigar a ocorrência do erro tipo i – i.e., traz o número de oportunidades observadas para a ocorrência do erro tipo i ;
- **“Erros Observados”:** identificado em cinza na Fig. 27, este é o nó de evidência na rede. Neste modelo, este nó traz a distribuição de probabilidade do número de ocorrências – discriminado em cada estado – do erro do tipo i , em b oportunidades. Em conjunto com o nó “Observações”, permite o lançamento de dados (e.g., opinião de especialistas, observações de campo) e a atualização de toda a rede. A TPC para este nó foi preenchida de acordo com a Eq. (101), onde b provém do nó “Observações” e e é um estado do próprio nó. Em princípio foram definidos 22 estados, representando o número de observações do erro tipo i , sendo que o estado “21 ou mais” refere-se à probabilidade de ocorrer de 21 a 100 observações – o Apêndice A apresenta uma versão resumida desta TPC;
- **“Peso da subpopulação”:** identificado em azul na Fig. 27, este nó apresenta tantos estados quanto forem as variáveis do tipo de HEP_φ . A cada estado se associa a representatividade a priori de uma subpopulação. O preenchimento da TPC para este nó foi feito conforme a Tab. 31;
- **“Sinais contrários e ausência de sinais”:** este nó representa a variabilidade populacional para a probabilidade de erro do tipo “sinais contrários e ausência de sinais”; identificado em laranja na Fig. 27, apresenta os mesmos estados do nó para a variável do tipo $P_{i,\varphi}$ mais abrangente, ou seja, com maior amplitude de probabilidades entre seus estados. O preenchimento da TPC para este nó considerou, dada uma subpopulação φ , $P(p_i|p_{i,\varphi}, \varphi)$ igual a 1 para p_i igual a $p_{i,\varphi}$, e igual a 0, em caso contrário – o Apêndice A apresenta uma versão resumida desta TPC.

Fig. 27 – RB para o exemplo de aplicação

Como esperado, as distribuições apresentadas nesta RB (Fig. 27) são idênticas às obtidas pela aplicação do equacionamento proposto na seção anterior. As probabilidades para os estados do nó “sinais contrários e ausência de sinais”, por exemplo, são iguais às apresentadas na Tab. 32.

Nesta RB (Fig. 27), a evidência de e igual a 3 e b igual a 100 utilizada no exemplo da subseção 4.2.1 é equivalente à observação do estado “3” no nó “Erros Observados”. A RB atualizada, dada esta evidência, foi reproduzida na Fig. 28.

Fig. 28 – RB atualizada para o exemplo de aplicação

Na RB atualizada (Fig. 28), verifica-se que as distribuições obtidas na subseção 4.2.1 são idênticas às apresentadas nos nós “Peso da Subpopulação” e “sinais contrários e ausência de sinais”, como pode ser visto na comparação com a Tab. 34 e com a Tab. 33, respectivamente.

Ressalte-se que os resultados apresentados nesta seção são ilustrativos. No próximo capítulo serão apresentadas as variabilidades para os tipos de erros propostos por Reason (1990) – incluindo o tipo de erro “sinais contrários e ausência de sinais” – que serão utilizadas no desenvolvimento do modelo prospectivo de desempenho humano, e que foram calculadas com base em diferentes fontes de dados. Isto foi feito após uma discussão mais abrangente sobre as diferentes fontes de dados de desempenho disponíveis – e.g., THERP – e sobre as formas usuais de classificação do erro humano – e.g., baseadas em modelos de cognição humana (REASON, 1990). No próximo capítulo também serão discutidos os efeitos quantitativos das associações sobre as estimativas das variabilidades dos tipos de erro.

4.3 COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO

O conhecimento da confiabilidade humana é extensivamente requisitado em análises de desempenho e em análises de risco. A importância da consideração do fator humano na concepção de sistemas é consensual desde os primeiros anos de desenvolvimento da APS (ABO; MAGED; RAOUF, 1979; PAPIN, 2011). Assim, o uso dos resultados das ACH e das APS para selecionar alternativas de projeto não é um conceito novo (HANNAMAN, 1986), e foi aplicado ou ressaltado em várias áreas – e.g., IHM (BUBB, 1988; O'HARA; HALL, 1992; FILGUEIRAS, 1999; KIM, 2001; CACCIABUE, 2010; HICKLING; BOWIE, 2013), sistemas de emergência (KIRWAN, 1987; REER, 1994; BARDSLEY, 2013), atividades de plantas químicas (KIRWAN, 1997a), processos operacionais (YU; HWANG; HUANG, 1999), equipamentos médicos e instrumentos cirúrgicos (LIN et al., 2014; MALIK; WHITE; MACEWEN, 2003; JOICE; HANNA; CUSCHIERI, 1998), tarefas de projetos estruturais (STEWART, 1992), automobilística (GSTALTER; FASTENMEIER, 2010), embarcações militares (GREGORIADES; SUTCLIFFE, 2008), sistemas de mísseis

(YU et al., 2000) e controle de tráfego aéreo (ROGNIN; BLANQUART, 2001). Este tipo de informação, nem sempre disponível, é fundamental para o desenvolvimento de modelos preditivos e/ou retrospectivos baseados na quantificação do desempenho de sistemas que envolvam o elemento humano.

Este capítulo apresentou a primeira parte da descrição da TECHR, uma técnica que visa o desenvolvimento de um modelo prospectivo do desempenho humano aplicável à fase de concepção de sistemas. Assim, nesta primeira parte, foi apresentado o equacionamento para o levantamento de curvas de probabilidades de tipos de erro humano partindo das HEP de ações quantificadas e o equacionamento para a combinação destas curvas, resultando na variabilidade a priori da probabilidade de um tipo de erro. Além disto, foi apresentado o equacionamento para a atualização futura desta variabilidade mediante as evidências sobre o desempenho humano (dados obtidos a posteriori) específicas à área de aplicação do sistema em concepção – ressalte-se que, para permitir a atualização, este equacionamento não exige a definição de uma família de funções de probabilidades para as variáveis envolvidas.

Como demonstrado no exemplo de aplicação (seção 4.2), o equacionamento apresentado neste capítulo é compatível com a proposta de desenvolvimento de um modelo prospectivo de desempenho humano em RB, o que facilita a integração dos resultados da técnica ao processo de concepção de sistemas complexos proposto no Capítulo 3.

Ressalte-se que, além deste capítulo, a TECHR está sendo apresentada nos Capítulos 5 e 6, e seu emprego no contexto da concepção de sistemas será exposto nos Capítulos 7 e 8.

5 APLICAÇÃO DA TECHR: BANCO DE PROBABILIDADES DOS TIPOS DE ERRO HUMANO

Este capítulo traz a primeira parte da aplicação da TECHR, apresentando a quantificação das probabilidades dos diversos tipos de erro listados na taxonomia do erro humano proposta por Reason (1990). Para tanto, foram selecionados os dados de desempenho humano apresentados em diversas técnicas de ACH, baseadas em dados empíricos (e.g., operação de instalações que operam ou operaram nos últimos anos), opiniões de especialistas e/ou simulações, sendo utilizados como critérios a disponibilidade da técnica, a origem de sua base quantitativa e a sua fiabilidade, conforme apresentada em diversos estudos comparativos das técnicas de ACH. O texto deste capítulo foi dividido em duas seções principais: a primeira, tratando da seleção dos dados a serem utilizados na TECHR, ressaltando os critérios de seleção e descrevendo as fontes selecionadas; e a segunda, trazendo o desenvolvimento do modelo quantitativo propriamente dito – constituindo-se na primeira parte do modelo prospectivo de desempenho humano concluído no Capítulo 6 –, com a associação de tipos de erro às ações consideradas em cada fonte de dados, e a apresentação dos resultados quantitativos obtidos para cada tipo de erro, conforme o equacionamento e o modelo em RB apresentados no Capítulo 4 para a combinação de dados.

5.1 SELEÇÃO DE DADOS

Esta seção apresenta as diversas fontes de dados que estão sendo utilizadas neste estudo, descreve os critérios para sua seleção e organiza os dados obtidos destas fontes. Ressalte-se que não é feita uma descrição detalhada das técnicas e análises apresentadas – para tanto, recomenda-se a leitura das referências citadas –, mas a descrição dos dados necessários ao desenvolvimento e ao entendimento do modelo e resultados quantitativos apresentados na seção seguinte e no próximo capítulo.

5.1.1 Critérios de seleção

Os três critérios para a seleção das fontes de dados – utilizadas neste trabalho para estimar as probabilidades dos diversos tipos de erro humano – são os seguintes:

- **1º Critério – Origem da base de dados:** de acordo com este critério, foram selecionadas as fontes de dados que apresentam bases quantitativas originais – e.g., opinião de especialistas, observações de campo, simulações. As técnicas que não apresentam banco de dados não foram selecionadas, e as técnicas que apresentam dados com base em outras técnicas foram preteridas em relação a estas;
- **2º Critério – Fiabilidade das bases e resultados quantitativos:** as fontes de dados quantitativos tiveram suas bases de dados verificadas em relação a sua fiabilidade. Para tanto, foram exploradas as publicações que direta ou indiretamente apresentam comparações, avaliações ou validações de dados quantitativos de desempenho humano, tanto em relação à sua base de dados quanto em relação aos dados que produz. Ademais, foi ponderado o seu uso corrente para a quantificação do erro humano – sendo considerado que a frequência de uso da fonte é uma expressão de credibilidade junto aos especialistas em ACH;
- **3º Critério – Disponibilidade dos dados:** foram selecionadas as fontes de dados que não são fechadas ou que, no caso de domínio próprio, permitam a publicação de sua base de dados – considerando a limitação de recursos para este trabalho.

Outro fator importante – não caracterizado, porém, como critério de seleção – foi o tempo disponível para a pesquisa de possíveis fontes de dados. Este fator, porém, não foi considerado como um critério de seleção ou um fator restritivo para o desenvolvimento uma vez que o modelo e seu banco de dados apresentam a possibilidade de atualização na medida em que mais informações forem obtidas. No entanto, apesar de listadas, foram desconsideradas neste capítulo as possíveis fontes de dados com informações consideradas insuficientes para que os três critérios de seleção descritos pudessem ser ponderados.

5.1.2 Fontes selecionadas

O resultado do trabalho de seleção das fontes de dados, de acordo com os critérios apresentados na subseção anterior, está sintetizado na Tab. 35 – por conta da sua extensão, esta tabela foi apresentada no Apêndice B. Nas primeiras duas colunas desta tabela estão apresentados o acrônimo – ou a designação mais usual – da fonte e sua nomeação. Nas colunas seguintes, são apresentadas as avaliações comentadas dos critérios de seleção – incluindo as referências que orientaram as análises. O atendimento de cada critério pelas possíveis fontes de dados foi sinalizado (com ✓), sendo sombreadas as linhas referentes às fontes que atendem a todos os critérios.

Visto que esta avaliação se limitou às informações disponíveis durante a elaboração da Tab. 35, não estão sendo descartadas as possíveis fontes não citadas ou que não foram aprovadas nos critérios de seleção. Em trabalho futuro, na medida em que mais informações estejam disponíveis, pretende-se realizar a atualização desta tabela. Além de que, foram indicados, nas respectivas células, os casos em que as informações disponíveis para a avaliação foram consideradas insuficientes. Deste modo, a Tab. 35 expressa a aprovação em relação aos critérios de seleção, e não a reprovação da fonte de dados.

Assim, considerando apenas as fontes aprovadas nos três critérios, foram selecionadas as técnicas CREAM, HEART, INTENT, TESEO e THERP como fontes de dados para esta primeira aplicação da TECHR. É interessante notar que nenhuma destas técnicas apresenta o dado “cru” de desempenho humano, i.e., os dados empíricos originais utilizados para gerar as HEP (CHANDLER et al., 2006), e que, com exceção da CREAM, todas são consideradas de 1ª geração (BELL; HOLROYD, 2009). Este resultado é um reflexo da dificuldade em gerar e organizar dados quantitativos suficientemente abrangentes para a avaliação da infinidade de fatores que determinam o desempenho humano – e que vêm sendo considerados nas novas abordagens de ACH [este tipo de dado permitiria uma melhor ponderação quantitativa do contexto nas técnicas de 2ª geração, com a fiabilidade observada pelas técnicas de 1ª geração (KIRWAN; GIBSON, 2007a), sem grande dependência do julgamento de especialistas].

5.1.3 Dados utilizados

A TECHR é uma técnica concebida para a consideração quantitativa da confiabilidade humana nas primeiras fases da concepção de sistemas complexos. Nestas fases, as dúvidas sobre o contexto de aplicação do sistema são grandes e as considerações quantitativas devem carregar incertezas medidas de forma proporcional a essa falta de conhecimento, permitindo o cálculo mais realista da confiabilidade e/ou do risco associado a um sistema (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015).

Em respeito às técnicas selecionadas como base de dados para este trabalho, sua aplicação – geração de HEP para contextos específicos – pode resultar em estimativas raramente validadas empiricamente (BORING et al., 2008). As suas HEP básicas, no entanto, apresentam fortes laços com dados empíricos de desempenho humano.

Sendo assim, das fontes aprovadas nos critérios definidos na subseção 5.1.2, foram isoladas as HEP básicas e suas incertezas, visto que estes dados apresentam-se distribuídos (refletindo incertezas epistemológicas e a variabilidade do desempenho humano) e que podem fundamentar um modelo genérico de desempenho humano. As tabelas a seguir apresentam estes dados e estão descritas na sequência, juntamente com breves explicações sobre as fontes de dados selecionadas – CREAM, HEART, INTENT, TESEO e THERP – e sobre como seus dados serão aproveitados ou desconsiderados na quantificação dos tipos de erro humano proposta no capítulo anterior.

5.1.3.1 CREAM

A CREAM (HOLLNAGEL, 1998) é uma técnica de 2ª geração desenvolvida com base no modelo COCOM (*Contextual Control Model*), focado na identificação e quantificação de erros cognitivos (HOLLNAGEL, 1993), e representa um avanço para a ACH em relação às técnicas de 1ª geração. Esta técnica amplia a variedade de PSF – chamados CPC (*Common Performance Condition*) na CREAM – em relação ao que é tipicamente considerado pelas técnicas de 1ª geração. Além disto,

seus PSF não são considerados independentes, mas são definidos pelo contexto em que a ação humana se desenvolve. Para a aplicação desta técnica, é requerido que o analista decomponha a tarefa de interesse em ações humanas compatíveis com as atividades cognitivas apresentadas em seu modelo, e que serão analisadas individualmente.

A CREAM pode ser utilizada em triagens ou análises detalhadas. Na triagem, seu objetivo é selecionar tarefas para o estudo mais apurado, se baseando na avaliação do acréscimo ou redução de confiabilidade em função da variação de nove PSF – para isto, é fornecida uma matriz que, dados o número de PSF afetados positivamente e o número de PSF afetados negativamente, determina a faixa de HEP em que a ação se enquadra. Na análise detalhada, são seguidos os seguintes passos: 1) Associação da ação a uma das quinze atividades cognitivas pré-estabelecidas; 2) Identificação do tipo de função humana associada à ação, entre os mencionados na Tab. 36, primeira coluna; 3) Seleção dos tipos de erro humano associados à ação – a técnica apresenta treze tipos de erro, tanto de omissão quanto de comissão, associados a cada tipo de função humana, mencionados na segunda coluna da Tab. 36; 4) De acordo com os tipos de erro humano, determinação da HEP e dos limites de incerteza para a ação – entre os definidos na Tab. 36; 5) Ajuste da HEP da ação de acordo com os estados dos nove PSF listados e do tipo de função humana. A HEP na tarefa será a soma das HEP obtidas para cada ação.

Tab. 36 – HEP na CREAM (CHANDLER et al., 2006; HOLLNAGEL, 1998)

<i>Função Humana</i>	<i>Tipo de Erro</i>	<i>Limite Inferior (Percentil 5%)</i>	<i>Valor Nominal</i>	<i>Limite Superior (Percentil 95%)</i>
Observação	<i>O1. Observação de objeto errado</i>	3,00E-04	1,00E-03	3,00E-03
	<i>O2. Identificação errada</i>	1,00E-03	3,00E-03	9,00E-03
	<i>O3. Observação não realizada</i>	1,00E-03	3,00E-03	9,00E-03
Interpretação	<i>I1. Falha de diagnóstico</i>	9,00E-02	2,00E-01	6,00E-01
	<i>I2. Erro de decisão</i>	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-01
	<i>I3. Interpretação atrasada</i>	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-01
Planejamento	<i>P1. Erro de Prioridade</i>	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-01
	<i>P2. Planejamento Inadequado</i>	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-01
Execução	<i>E1. Tipo de ação errado</i>	1,00E-03	3,00E-03	9,00E-03
	<i>E2. Ação no tempo errado</i>	1,00E-03	3,00E-03	9,00E-03
	<i>E3. Atuação no objeto errado</i>	5,00E-05	5,00E-04	5,00E-03
	<i>E4. Ação fora de sequência</i>	1,00E-03	3,00E-03	9,00E-03
	<i>E5. Falta de ação</i>	2,50E-02	3,00E-02	4,00E-02

A CREAM não foi desenvolvida para uma indústria específica, de forma que seus dados são de aplicação universal. Ademais, potencialmente, qualquer ação de operação pode ser mapeada até o nível da atividade cognitiva e ser quantificada

pela CREAM (CHANDLER et al., 2006). Neste trabalho, os dados da CREAM presentes na Tab. 36 serão explorados após a correlação direta entre seus tipos de função humana – e de erro – e os tipos de erro listados na taxonomia do erro humano proposta por Reason (1990), conforme descritos na subseção 5.2.1.

5.1.3.2 HEART

A HEART foi apresentada por Williams (1985) e detalhada em publicações subsequentes – e.g., por Williams (1986, 1988, 1989, 1992). Seu desenvolvimento se baseia em estudos de desempenho humano e foi marcado pela consideração de que a confiabilidade humana básica é dependente da natureza genérica da tarefa a ser realizada, e que esta confiabilidade tende a um valor nominal de probabilidade quando as condições de execução se aproximam das ideais. Além disto, a HEART considera que se as condições ideais não estiverem presentes, a confiabilidade humana predita pode degradar em função da extensão em que os PSF – chamados EPC (Error Producing Conditions) na HEART – afetam a tarefa.

Para a execução da HEART, não é necessária a decomposição da tarefa em ações humanas detalhas. Na verdade, deve haver decomposição até o ponto em que sejam encontradas tarefas que se assemelhem a uma das nove GTT (*Generic Task Type*) descritas na HEART, às quais estão associadas HEP nominais e suas incertezas, conforme apresentadas na Tab. 37. Estas HEP nominais podem ser ajustadas em função dos 38 PSF presentes na técnica (CHANDLER et al., 2006) – aos quais a HEART associa os efeitos máximos (PSF_{EM}). Para cada PSF considerado impactante, o analista deve encontrar o respectivo APOA (*Assessed Proportion of Affect*) para determinar o acréscimo a ser observado na HEP nominal. Assim, para o cálculo da HEP na tarefa, dados n PSF impactantes, é empregada a Eq. (102). Se o valor encontrado for maior que um, considera-se a HEP na tarefa igual a 1.

$$HEP_{tarefa} = HEP_{nominal} \prod_{j=1}^n \left\{ \left[(PSF_{EM_j} - 1) * APOA_j \right] + 1 \right\} \quad (102)$$

A HEART foi projetada para ser uma técnica de quantificação simples e aplicável a qualquer indústria ou situação semelhante às modeladas. Potencialmente, qualquer tarefa de operação pode ser associada às tarefas genéricas da HEART. Para o aproveitamento dos dados da HEART neste trabalho, as tarefas presentes na Tab. 37 serão correlacionadas diretamente aos tipos de erro propostos por Reason (1990), conforme descritos na subseção 5.2.1.

Tab. 37 – HEP nominal e limites de incerteza na HEART (WILLIAMS, 1985)

<i>Tarefa Genérica</i>	<i>Descrição</i>	<i>Limite Inferior (Percentil 5%)</i>	<i>Valor Nominal</i>	<i>Limite Superior (Percentil de 95%)</i>
A	<i>Totalmente não familiar, realizada rapidamente sem noção real de possíveis consequências.</i>	3,50E-01	5,50E-01	9,70E-01
B	<i>Alterar ou restaurar o sistema para um estado novo ou original em uma única tentativa sem supervisão ou procedimentos.</i>	1,40E-01	2,60E-01	4,20E-01
C	<i>Tarefa complexa que requer alto nível de compreensão e habilidade.</i>	1,20E-01	1,60E-01	2,80E-01
D	<i>Tarefa bastante simples realizada rapidamente ou dando pouca atenção.</i>	6,00E-02	9,00E-02	1,30E-01
E	<i>Tarefa rotineira, muito treinada/praticada, ou rápida que requer um baixo nível de habilidade (relativamente às demais na planta).</i>	7,00E-03	2,00E-02	4,50E-02
F	<i>Restaurar ou alterar um sistema para o estado original ou novo seguindo procedimentos, com alguma verificação.</i>	8,00E-04	3,00E-03	7,00E-03
G	<i>Tarefa completamente familiar, bem projetada, muito praticada, rotineira que ocorre várias vezes por hora, realizada com os padrões mais altos possíveis, por profissional altamente motivado, altamente treinado e experiente, totalmente consciente das implicações de fracasso, com tempo para corrigir erro potencial, mas sem o benefício de auxílios significativos ao seu trabalho.</i>	8,00E-05	4,00E-04	9,00E-03
H	<i>Responder corretamente a comandos do sistema mesmo quando não há um sistema de supervisão ampliado ou automatizado proporcionando uma interpretação precisa do estado do sistema.</i>	6,00E-06	2,00E-05	9,00E-04
M	<i>Tarefa diversa para a qual nenhuma descrição pode ser encontrada.</i>	8,00E-03	3,00E-02	1,10E-01

5.1.3.3 INTENT

O INTENT (GERTMAN et al., 1992) é um método desenvolvido para a identificação e quantificação de “erros de intenção” que, assim como os “erros de seleção” e os “erros de execução” (e.g., erros quantificados na THERP), são tipos de “erro de comissão”. A identificação se baseia no estudo – por meio de técnicas analíticas – de cenários em que os erros de intenção estejam potencialmente presentes, e a quantificação é feita por meio de consulta aos especialistas em desempenho humano. Em sua primeira aplicação, com base em dados da área nuclear e na consulta a vinte especialistas em desempenho humano, foram listados e quantificados os tipos de erro de intenção reproduzidos na Tab. 38, agrupados em quatro categorias definidas pelas características destes tipos de erro. Ademais, foram levantados onze PSF que afetam as HEP dos tipos de erro identificados.

Na ocasião da quantificação dos erros apresentados na Tab. 38, a opinião dos especialistas foi utilizada para a determinação dos limites inferior e superior para

cada HEP – percentil 5% e 95%, respectivamente. O valor nominal apresentado na quarta coluna foi calculado assumindo a distribuição lognormal para as HEP – conforme proposto em Gertman et al. (1992) – sendo igualado à mediana.

Tab. 38 – HEP e limites de incerteza no INTENT [adaptada de Gertman et al. (1992)]

<i>Categorias de erro</i>	<i>Tipo de Erro</i>	<i>Limite Inferior (Percentil 5%)</i>	<i>Valor Nominal</i>	<i>Limite Superior (Percentil 95%)</i>
Consequência da Ação	1. Burlar procedimento com consequências potencialmente catastróficas.	6,00E-05	2,12E-03	7,50E-02
	2. Burlar procedimento com consequências menores.	3,30E-04	5,33E-03	8,60E-02
	3. Tolerar uma situação de variação excessiva com consequências menores.	1,00E-02	6,00E-02	3,60E-01
	4. Tolerar uma situação de variação excessiva com consequências moderadas.	2,30E-03	1,86E-02	1,50E-01
Ações que levam à burla	5. Violar procedimento e reconfigurar equipamento.	5,50E-04	6,76E-03	8,30E-02
	6. Violar procedimento e conceber fórmula própria.	1,60E-03	8,67E-03	4,70E-02
	7. Verificador realizando Garantia de Qualidade tolerar discrepâncias	1,20E-03	1,20E-02	1,20E-01
	8. Falha de causa comum devido à cultura de segurança pobre.	4,60E-03	3,03E-02	2,00E-01
Resposta definida pela equipe técnica	9. Diagnosticar incorretamente dados sintomas semelhantes. Apreender sequência com base em estímulos.	1,30E-02	4,84E-02	1,80E-01
	10. Diagnosticar corretamente e responder errado. Apreender sequência com base em resposta definida	3,90E-03	2,93E-02	2,20E-01
	11. Estados com objetivos concorrentes levam a conclusões erradas.	8,90E-03	3,89E-02	1,70E-01
	12. Notar sintomas e interpretar incorretamente.	4,20E-03	2,05E-02	1,00E-01
Dependência de recursos	13. Ação correta tomada durante a evolução errada da planta.	1,00E-03	5,66E-03	3,20E-02
	14. Em situação de falha múltipla, a equipe resolve as menos importantes.	1,20E-03	1,20E-02	1,20E-01
	15. Recursos/instrumentação providos são insuficientes.	7,40E-02	1,33E-01	2,40E-01
	16. Equipes consultam recursos inapropriados em emergência	1,90E-03	1,57E-02	1,30E-01
	17. Comunicação inadequada resulta em ações impróprias.	3,30E-03	2,57E-02	2,00E-01
	18. Demanda excessiva da tarefa resulta em julgamento inadequado.	2,90E-02	9,17E-02	2,90E-01
	19. Duração excessiva da tarefa resulta em julgamento inadequado.	1,60E-02	3,79E-02	9,00E-02
	20. Modo Comum: Julgamento inadequado porque processos, P&IDs (Piping and Instrumentation Diagram) e convenções operacionais não combinam.	2,90E-02	9,17E-02	2,90E-01

Com base nos resultados iniciais do INTENT, seus autores propõem uma técnica que possibilita a quantificação de erros de intenção para diferentes contextos. Para isso, dada uma tarefa, podem ser seguidos os seguintes passos: 1) identificação do erro de intenção e associação a um dos erros presentes na Tab. 38 – seleção em função das semelhanças; 2) de acordo com o contexto em que a tarefa se desenvolve, conceituação dos onze PSF associados ao erro selecionado e cálculo do conceito acumulado – soma do conceito de cada PSF; 3) Cálculo da HEP específica – ao contexto da tarefa – em função do conceito acumulado e da distribuição da HEP para o tipo de erro.

Para o aproveitamento dos dados do INTENT neste trabalho, os tipos de erro presentes na Tab. 38 serão correlacionados diretamente aos tipos de erro propostos por Reason (1990), conforme descritos na subseção 5.2.1.

5.1.3.4 TESEO

A TESEO (BELLO; COLOMBARI, 1980) foi construída com dados baseados

em análises de especialistas da indústria nuclear e de processos (BELL; HOLROYD, 2009), partindo da premissa de que a HEP pode ser representada em função do tipo de tarefa, do tempo disponível para completar a tarefa, das qualidades do operador e do seu estado de ansiedade, e de fatores ambientais e ergonômicos. Assim, foram definidos os cinco parâmetros – apresentados na Tab. 39.

Tab. 39 – Parâmetros para a HEP na TESEO [adaptada de Madonna et al. (2009)]

Parâmetro		Estados		Valores
K_1	Tipo de tarefa	Tipo de tarefa	<i>Simples, rotineira</i>	1,00E-03
			<i>Requer atenção, rotineira</i>	1,00E-02
			<i>Não rotineira</i>	1,00E-01
K_2	Estresse por limitação de tempo	Tarefa rotineira	<i>2 s</i>	10
			<i>10 s</i>	1
			<i>20 s</i>	0,5
		Tempo disponível para completar a tarefa	<i>3 s</i>	10
			<i>30 s</i>	1
			<i>45 s</i>	0,3
			<i>60 s</i>	0,1
K_3	Tipo de operador	Qualidades do operador	<i>Selecionado com cuidado, especialista, bem treinado</i>	0,5
			<i>Conhecimento e treinamento medianos</i>	1
			<i>Pouco conhecimento, pouco treinamento</i>	3
K_4	Ansiedade	Estado de Ansiedade	<i>Situação grave de emergência</i>	3
			<i>Situação de emergência potencial</i>	2
			<i>Situação Normal</i>	1
K_5	Fatores Ambientais e Ergonômicos	Microclima e HMI (Human-Machine Interface)	<i>Microclima excelente, HMI excelente</i>	0,7
			<i>Microclima bom, HMI boa</i>	1
			<i>Microclima mediano, HMI mediana</i>	3
			<i>Microclima mediano, HMI pobre</i>	7
			<i>Microclima ruim, HMI pobre</i>	10

Como pode ser observado na Tab. 39, o parâmetro k_1 apresenta características de HEP nominal, sendo considerados valores típicos para os tipos de tarefa, de acordo com a opinião dos autores da técnica (não são apresentados limites de incerteza), e os demais apresentam características de PSF. Na aplicação da técnica, de acordo com o estudo da tarefa, são definidos os estados destes parâmetros, o que permite a quantificação da HEP na tarefa. Isto é feito por meio da Eq. (103), considerando os valores associados aos estados dos parâmetros, apresentados na última coluna da Tab. 39. Caso a aplicação desta equação resulte em valor maior que 1, considera-se a HEP na tarefa igual a 1.

$$HEP_{tarefa} = k_1 * k_2 * k_3 * k_4 * k_5 \quad (103)$$

Ressalte-se que os dados da TESEO não estão sendo considerados na quantificação dos tipos de erro, conforme justificativa apresentada na subseção 5.2.2 – não foi possível correlacioná-los diretamente aos tipos de erro propostos por Reason (1990).

5.1.3.5 THERP

A THERP foi desenvolvida por Swain e Guttman (1983), do Sandia National Laboratories, e apresentada para a U. S. Nuclear Regulatory Commission em relatório de 1983. Seu desenvolvimento inicial, no entanto, foi voltado à área de defesa, ainda na década de 1960, e seu amadurecimento – como ferramenta de ACH capaz de compor as análises de confiabilidade e de risco em plantas nucleares de potência – pode ser atribuído à sua aplicação na APS publicada por Rasmussen em 1975 (USNRC, 1975; BORING, 2012). Seus dados consistem em probabilidades de diferentes tipos de erro de comissão e omissão, com limites de incerteza que já consideram erros epistemológicos e a variabilidade associada aos PSF, em ações específicas – divididas entre as realizadas em operação normal e as realizadas após a identificação de anomalias.

Além de ser uma técnica quantitativa, a THERP apresenta uma metodologia para a ACH que inclui a análise de tarefas e um processo para a discriminação de erros típicos. Em sua fase qualitativa, são identificados os PSF impactantes e são construídas as topografias das árvores de eventos que representam a tarefa, sendo decomposta em ações análogas às presentes na THERP – assim, a execução correta ou incorreta é representada com divisões binárias, de forma semelhante à modelagem da falha de equipamentos. A técnica explicita três PSF (treinamento, estresse e experiência) para as ações modeladas, mas menciona e dá liberdade para acréscimos de mais PSF. Em sua fase quantitativa, a THERP apresenta HEP nominais para as ações, que podem ser ajustadas de acordo com os PSF observados, e compõem a HEP básica e, após a consideração de dependências e possibilidades de recuperação, a HEP conjunta da tarefa.

Assim, a aplicação da THERP pode ser resumida nos seguintes passos (MARTINS; MATURANA, 2010), que seguem a familiarização com a planta: 1) Definir as falhas do sistema: identificar todos os subsistemas na operação que podem ser influenciados ou afetados por fatores humanos; 2) Listar e analisar as ações humanas relacionadas à operação do sistema – elaborar uma lista de tarefas considerando todas as operações humanas e realizando uma análise detalhada de cada tarefa, e construir as árvores de eventos detalhando as atividades das tarefas

impactantes para o risco/confiabilidade, considerando dependências e possibilidades de recuperação; 3) Estimar as probabilidades de erro relevantes (das atividades que trazem risco ao sistema, identificadas no passo anterior): determinar as HEP para as atividades por meio de banco de dados, julgamento de especialistas e/ou experiência, considerando os PSF, e quantificar as árvores de eventos para definir as HEP conjuntas das tarefas; 4) Estimar o efeito dos erros humanos nos eventos de falha do sistema: integrar os erros humanos nas árvores de falhas do sistema como um todo; 5) Opções de Controle de Risco: recomendar mudanças no sistema e recalcular as probabilidades de falhas do sistema modificado.

Os dados apresentados na THERP são genéricos e, para situações específicas, devem ser aplicadas as análises propostas na técnica. Assim, são apresentadas numerosas ações que podem ter suas HEP quantificadas com o uso de 27 tabelas – e.g., trazendo HEP nominais, instruções para a definição de limites de incerteza, equações para a quantificação de dependências entre ações, probabilidades condicionadas ao sucesso em atividade anterior, ao número de operadores ou tempo para inspeção. Destas tabelas, 18 consideram distribuições lognormais para as HEP das ações, sendo caracterizadas por: 1) HEP nominal, que é a mediana da distribuição; e 2) fator de erro EF para os percentis de 5% e de 95%, que se associam à melhor e à pior combinação de PSF, respectivamente. Além da necessidade de apresentar os dados em uma distribuição assimétrica – para que as diferenças individuais de desempenho fossem ressaltadas – os autores justificaram a adoção da distribuição lognormal com base nos resultados empíricos de alguns trabalhos sobre o desempenho humano. Entretanto, os autores ressaltam que os experimentos podem conduzir a diferentes tipos de distribuição, e que, para a ACH, a importância relativa do tipo de função assumida é pequena.

Os dados da THERP empregados neste trabalho estão referenciados na Tab. 40 que, por conta da sua extensão, foi apresentada no Apêndice B. Nesta tabela, a primeira coluna (“Fonte”) refere-se à tabela de origem dos dados, conforme apresentada por Swain e Guttman (1983), a segunda coluna (“Item”) refere-se a uma ação específica, a terceira coluna refere-se à descrição geral das ações da mesma tabela – as ações em itens diferentes podem ser descritas de forma semelhante, mas apresentam contextos de execução diferentes. As duas últimas colunas da Tab. 40 referem-se à HEP nominal e ao EF que caracterizam a HEP da

ação. As ações listadas nesta tabela serão correlacionadas diretamente aos tipos de erro propostos por Reason (1990), conforme descritos na seção 5.2.

5.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Esta seção descreve o início da construção e quantificação do modelo prospectivo de desempenho humano, partindo das fontes de dados selecionadas na seção anterior, e do equacionamento e modelagem em RB propostos no capítulo anterior. O objetivo desta seção é apresentar a quantificação dos tipos de erro humano incorporados no modelo resultante desta primeira aplicação da TECHR. Assim, inicialmente, serão apresentados os tipos de erro humano a serem considerados e as associações destes tipos de erro às ações selecionadas na seção anterior. Na sequência, será descrito o desenvolvimento e a quantificação das RB que calculam as funções de probabilidades para cada tipo de erro. E, para finalizar, serão apresentadas observações em relação aos resultados obtidos deste modelo, incluindo o efeito da quantidade de tipos de erro atribuídos às ações na base de dados.

5.2.1 Tipos de erro humano

No desempenho humano, de maneira geral, é presumida a ocorrência do erro quando são verificadas consequências indesejadas depois de uma ação (erro de comissão) ou em sua ausência, quando há necessidade (erro de omissão). Hollnagel (1993) definiu as ações errôneas como aquelas que falham em produzir o resultado esperado e que assim levam a uma consequência indesejada. Por outro lado, apesar de as consequências indesejadas definirem o erro, não necessariamente implicam na ocorrência do erro humano por ação voluntária. Reason (1990) salientou que o termo *erro* usualmente se aplica às situações em que houve a intenção de realizar algum tipo de ação (ação intencional), mas pode incluir casos em que não há intenção inicial (ação involuntária – e.g., um esbarrão em uma alavanca que altera a configuração do sistema).

As ações intencionais podem implicar em consequência indesejada quando a ação planejada e bem executada não resulta no que se intencionou – houve um “engano”, associado aos “erros cognitivos” (KIRWAN, 1998) – ou quando a execução não ocorre conforme planejada (houve um deslize), por exemplo, por falha de memória (houve um lapso) (REASON, 1990). Além disso, pode ocorrer a contravenção de regras, restrições ou procedimentos que, dependendo de um posicionamento estratégico, pode ser considerada uma ação errônea (houve uma violação) – as ações que objetivam o dano estão no foco de estudos de atividades terroristas (EZELL et al., 2010), e não são consideradas como erros de violação.

Para que uma consequência indesejada classifique uma ação como errônea (HOLLNAGEL, 1998), não é necessário que haja uma relação direta de causa e consequência – e.g., pode haver eventos intermediários, ações de indivíduos diferentes – configurando a existência dos “erros latentes”. Assim, quando identificados, os erros latentes ainda não resultaram em consequência indesejada e são associados às “quase perdas” – quando a sequência de ações resultaria em consequências indesejadas.

De forma geral, preceitua-se que o erro humano se origina na correlação desfavorável entre um homem falível e um contexto propício ao erro (SWAIN; GUTTMANN, 1983). Porém, em função do incipiente entendimento da cognição humana e da imaterialidade do erro humano, senão como característica de uma ação (ação errônea) (HOLLNAGEL, 1998), muitas vezes o estudo das correlações desfavoráveis é feito por meio de modelos heurísticos – e.g., baseados na teoria de processamento humano de informação (WICKENS et al., 2004). Dentre outros aspectos, estes modelos permitem definir causas conceituais para os erros humanos, classificá-los e, eventualmente, quantificá-los. Wickens et al. (2004), por exemplo, baseado no conceito de existência de várias fontes de processamento para manipular o fluxo e transformação da informação pelo indivíduo, propuseram um modelo genérico – descrevendo o processamento humano de informação sob a forma de estágios sequenciais (detecção → percepção → processo cognitivo superior: tomada de decisão / resolução de problemas / seleção de resposta → execução) que interagem com recursos de atenção, memória de trabalho e memória de longo prazo (admitindo a retroalimentação) – que permite a classificação dos erros humanos entre “erros sensoriais”, “erros de reconhecimento de padrões”,

“erros de atenção”, “erros de decisão”, e “erros de execução”.

A forma de classificar o erro humano pode ser tão diversificada – e.g., classificação por tipo de tarefa, de acordo com modelo cognitivo ou pelo contexto de ocorrência (KIRWAN, 1994) – quanto os objetivos de um modelo heurístico (e.g., análise de acidentes, quantificação do erro humano em uma indústria específica, considerando os dados disponíveis nesta indústria), sendo que muitas taxonomias já foram publicadas (BAZIUK; RIVERA; LEOD, 2014). A quase totalidade das fontes discriminadas na Tab. 35 (última coluna; vide o Apêndice B), apresenta uma taxonomia específica, explícita ou implícita (KIRWAN, 1994), para o erro humano. O GEMS (Generic Error Modeling System) (RASMUSSEN; DUNCAN; LEPLT, 1987), proposto por Reason (1990) com o objetivo de explicar os erros humanos, é a taxonomia mais difundida entre os especialistas em desempenho (WOOD, 2000; SHORROCK; KIRWAN, 2002, e deriva do modelo de processamento humano de informações proposto por Rasmussen (RASMUSSEN; DUNCAN; LEPLT, 1987; RASMUSSEN et al., 1981) – conhecido como SRK (*skill-rule-knowledge model*).

O SRK é empregado no estudo do comportamento humano, classificando as atividades humanas em três níveis, sendo que a ordem dos níveis representa um aumento na complexidade da cognição requerida, com as seguintes características: 1) Ações baseadas em habilidade (*skill*): refere-se às ações que exigem habilidades manuais, desenvolvidas com a prática rotineira – estas ações representam uma resposta rápida do indivíduo a um estímulo; 2) Ações baseadas em regras (*rule*): neste nível são classificadas as ações que dependem de regras memorizadas (situações predefinidas) pelo indivíduo; e 3) Ações baseadas em conhecimento (*knowledge*): neste nível são consideradas as ações mais complexas, não classificáveis nos níveis anteriores – apesar de Rasmussen considerar que o treinamento proporcionado pela execução dos outros tipos de ações seja fundamental para o desenvolvimento de ações classificadas neste nível.

Alinhado com o modelo SRK, o GEMS classifica as ações errôneas em níveis correlacionados de desempenho, com as seguintes características: 1) Nível de habilidade: podem ocorrer lapsos e deslizos e, de forma geral, as ações errôneas referem-se ao comportamento automático, com baixo nível de consciência individual – e; 2) Nível de regra: pode ocorrer engano baseado em regra – considera-se que o contexto determina a regra a ser adotada (ações mais adequadas), sendo que o

indivíduo ordena as regras por seu valor, baseado na frequência de sucesso na aplicação da regra; e 3) Nível de conhecimento: pode ocorrer engano baseado em conhecimento – as ações referem-se ao raciocínio complexo e à resolução de problemas em novas circunstâncias e os erros associados a estas ações se justificam nas limitações de recursos, no conhecimento incompleto ou no conhecimento incorreto. A Tab. 41 resume a taxonomia do erro humano derivada do GEMS, referida neste trabalho como taxonomia de Reason – a última coluna refere-se aos códigos associados aos tipos de erro e utilizados nos modelos apresentados mais adiante (também no próximo capítulo, estes tipos de erro serão considerados erros genéricos identificados pelo código EG).

Duas razões básicas fundamentaram a adoção do GEMS nesta aplicação da TECHR:

- **Opinião de especialistas sobre o GEMS:** a) combinado com o modelo SRK, é aceito como a mais abrangente taxonomia de erro humano (KIRWAN, 1994; WOOD, 2000); b) descreve o erro humano dentro de uma estrutura teoricamente plausível (SHORROCK; KIRWAN, 2002); c) O SRK é aplicável no desenvolvimento de uma ferramenta prospectiva (KIRWAN, 1994); e d) apresenta farta documentação para seu entendimento (REASON, 1990; RASMUSSEN; DUNCAN; LEPLT, 1987; REASON; EMBREY, 1985); e
- **Propósito deste trabalho:** o GEMS foi desenvolvido para classificar os erros humanos em diferentes contextos (Hollnagel, 1998), e o objetivo de sua taxonomia (por definição, o GEMS é um sistema genérico) vai ao encontro dos objetivos da TECHR – quantificar o erro humano para um modelo prospectivo de desempenho a ser utilizado na fase de concepção de sistemas complexos, quando o conhecimento restrito sobre o contexto de uso do sistema deve ser ponderado como incerteza sobre seu desempenho. Por outro lado, esta aplicabilidade a uma multiplicidade de contextos torna o GEMS desprovido de instrução para a identificação de tipos específicos de erro, sendo esta tarefa delegada ao especialista que o utiliza.

Tab. 41 – Taxonomia de Reason (1990)

Nível de Desempenho	Tipo de Erro	Características e Descrição	Cód.
Desempenho no Nível de Habilidade	Deslizes de dupla captura	<ul style="list-style-type: none"> Ação rotineira; Ambiente familiar; No momento da tomada de decisão, um evento (interno ou externo) desvia a atenção do indivíduo; O indivíduo toma a decisão de forma automática (por hábito). 	EG_1a
	Omissão depois de interrupção	<ul style="list-style-type: none"> Ação rotineira; No momento de execução de uma tarefa, o indivíduo é interrompido por um evento (interno ou externo), esquece onde estava na tarefa e deixa de realizar um de seus passos. 	EG_1b
	Redução de intenção	<ul style="list-style-type: none"> Durante a realização de uma tarefa, o indivíduo esquece o seu objetivo (perde consciência de toda a sequência de ações). 	EG_1c
	Confusão perceptiva	<ul style="list-style-type: none"> Ação rotineira; Por falta de atenção aos sentidos, o indivíduo faz uma seleção errônea. 	EG_1d
	Erros de interferência	<ul style="list-style-type: none"> Este erro consiste na troca de ações em uma mesma tarefa (sequência de ações) e sua substituição por ações semelhantes. 	EG_1e
	Omissão	<ul style="list-style-type: none"> Omissão de uma ação da tarefa ou de toda a sequência final de ações; Este erro é atribuído à falta de controle do estado da tarefa em relação aos seus propósitos. 	EG_1f
	Repetição	<ul style="list-style-type: none"> Na execução da tarefa, o indivíduo repete uma ação ou sequência de ações; O indivíduo assume que a tarefa tem um número de ações diferente do número real (necessário para sua conclusão). 	EG_1g
	Inversão	<ul style="list-style-type: none"> Na execução de uma tarefa, o indivíduo inverte a ordem de execução das ações. 	EG_1h
Desempenho no Nível de Regra	Primeiras exceções	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo não aprendeu a regra correta para a solução de um problema e crê na adequação de uma regra geral ou de uma regra parcialmente válida. 	EG_2a
	Sinais contrários e ausência de sinais	<ul style="list-style-type: none"> A regra adequada não é seguida porque os sinais confundem o indivíduo, não permitindo sua identificação. 	EG_2b
	Sobrecarga de informação	<ul style="list-style-type: none"> A grande quantidade de informações impede a consideração de tudo antes de decidir o que fazer (o indivíduo erra na escolha da regra e/ou em sua aplicação). 	EG_2c
	Força da regra	<ul style="list-style-type: none"> Em virtude da repetição no uso de determinada regra (que por isto torna-se forte), o indivíduo tende a empregá-la em detrimento das demais, favorecendo o erro. 	EG_2d
	Regras gerais	<ul style="list-style-type: none"> Por serem mais abrangentes, as regras gerais tendem a ser mais empregadas que regras específicas (e por isto tornam-se fortes), principalmente na ausência de informação, favorecendo o erro. 	EG_2e
	Redundância	<ul style="list-style-type: none"> A informação sempre presente, mesmo não relacionada a uma situação específica, pode influenciar na escolha de uma regra. 	EG_2f
	Rigidez	<ul style="list-style-type: none"> Na resolução de problemas, o indivíduo tende a replicar fórmulas (regras) de sucesso do seu passado, mesmo que soluções mais simples e adequadas estejam disponíveis. 	EG_2g
	Deficiências de decodificação	<ul style="list-style-type: none"> Na execução de uma tarefa o indivíduo não consegue reconhecer todas as condições necessárias para a determinação de como agir. 	EG_2h
	Ação deficiente: o contexto para a regra foi aprendido, mas a ação prevista pela regra é inadequada.	<ul style="list-style-type: none"> A regra aplicada é adequada (conforme aprendida); A ação prevista na regra é completamente errada. 	EG_2il
		<ul style="list-style-type: none"> A ação está de acordo com a regra, mas a ação é antiquada porque regras melhores estão disponíveis. 	EG_2iil
		<ul style="list-style-type: none"> A regra escolhida leva ao objetivo, mas com consequências indesejadas. 	EG_2iiil
	Seletividade	<ul style="list-style-type: none"> Durante a tarefa o indivíduo deixa de focar sua atenção em aspectos relevantes para a solução de seu problema, focando em aspectos irrelevantes. 	EG_3a
Desempenho no Nível de Conhecimento	Limitação da memória de trabalho	<ul style="list-style-type: none"> O problema excede a capacidade da memória de trabalho do indivíduo; 	EG_3b
	Longe dos olhos, longe da mente	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo tende a atentar mais para fatos que lhe estão disponíveis com mais facilidade, favorecendo a desconsideração dos fatos mais inacessíveis e que são importantes para o seu problema. 	EG_3c
	Viés de confirmação	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo tende a valorizar suas hipóteses iniciais em detrimento das evidências que encontra ao longo da solução do problema, favorecendo o erro. 	EG_3d
	Excesso de confiança	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo se apegar ao curso estabelecido inicialmente em detrimento de evidências que encontra ao longo da solução do problema, favorecendo o erro. 	EG_3e
	Revisão enviesada	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo considera, equivocadamente, ter levado em consideração todos os fatores importantes para a solução do problema. 	EG_3f
	Correlação ilusória	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo faz uma correlação entre duas ou mais variáveis dependentes de forma errônea (e.g., o indivíduo considera que se uma variável aumenta, a outra aumenta, quando na realidade não existe esta relação). 	EG_3g
	Efeito Halo	<ul style="list-style-type: none"> A avaliação de um item ou indivíduo interfere no julgamento de outros importantes fatores, favorecendo o erro (o indivíduo não faz sua avaliação de forma independente). 	EG_3h
	Problemas com a causalidade	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo simplifica muito as relações de causa e efeito, subestimando eventualidades que ocorrerão no futuro. 	EG_3i
	Problemas com retorno atrasado	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo tem dificuldade em construir um modelo preditivo quando o retorno de suas ações não é imediato; O erro é favorecido pela perda de sincronia entre as ações e seus resultados. 	EG_3jI
	Consideração insuficiente do processo no tempo	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo foca o estado atual e ignora o seu processo de desenvolvimento. 	EG_3jII
	Problemas com a complexidade: (erros associados à dificuldade individual em lidar com tarefas complexas).	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo tem dificuldade em lidar com processos que se desenvolvem exponencialmente, favorecendo o erro. 	EG_3jIII
	Pensamento em série causal e não em redes causais	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo tende ao pensamento em série, percebendo o resultado direto de sua ação e ignorando outros efeitos sobre o sistema. 	EG_3jIV
	Divagação temática	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo abandona um assunto ou tema, tratando-o de forma superficial, e inicia um novo assunto ou tema. 	EG_3jV
	Encasular	<ul style="list-style-type: none"> O indivíduo desenvolve um tópico do assunto muito além do necessário, desfavorecendo o desenvolvimento dos demais tópicos relevantes. 	EG_3jVI

5.2.2 Associações dos tipos de erro às ações selecionadas

No capítulo anterior, um dos tipos de erro de Reason foi quantificado, sendo obtida sua variabilidade populacional, considerando que três das HEP presentes na THERP resultassem de diferentes estratos da população, i.e., que cada estimativa de probabilidade de tipo de erro resultasse de uma subpopulação. Neste capítulo, o mesmo foi feito para os tipos de erro listados na Tab. 41, considerando, porém, as HEP selecionadas na seção 5.1 (cada HEP está associada a uma ação ou a um erro humano), e considerando que cada fonte de dados (e.g., HEART) representa uma subpopulação. Assim, para cada fonte de dados, foram obtidas diferentes estimativas para as funções de probabilidades dos tipos de erro – cada ação representa contextos diferentes para a manifestação dos tipos de erro associados – que foram combinadas em uma estimativa para a respectiva subpopulação. Para tanto, fez-se necessário o cruzamento entre os tipos de erro de Reason e as ações e erros selecionados.

Neste cruzamento foram consideradas as características das bases de dados e dos tipos de erro apresentados no GEMS (Reason, 1990). Para cada ação – ou tipo de erro, dependendo da fonte de dados (para evitar repetições, somente as ações são citadas no restante do texto) – selecionada, foram comparadas as informações disponíveis nas referências citadas na Tab. 35 (vide o Apêndice B) e os tipos de erro descritos na subseção 5.2.1. De forma geral, isto foi feito em três passos, constituídos das seguintes atividades: 1) Juntar toda a informação referente à ação presente na fonte de dados para a definição de seus contextos de execução; 2) Empregar o diagrama apresentado na Fig. 29, baseado nas definições dos tipos de erro (subseção 5.2.1) – o que resulta na associação da ação a um nível de desempenho do modelo SRK e em uma lista preliminar de erros associados à ação; e 3) Refinar a lista preliminar, comparando os dados sobre a ação e todos os tipos de erro no respectivo nível de desempenho – o que resulta na lista dos tipos de erro considerados mais prováveis.

A Fig. 29 representa uma tentativa de agrupar os tipos de erro de Reason de acordo com as suas características e, como citado, é um auxílio para a definição do grupo de possíveis tipos de erro para cada ação. Assim, de acordo com as respostas às questões (sim ou não), são apresentados possíveis tipos de erro e/ou

novas questões – em caso de dúvida, ambas as respostas são consideradas possíveis. Neste diagrama, os quadros hachurados representam tipos de erro (cinza para nível de habilidade, vermelho para nível de regra, e azul para nível de conhecimento – nas proximidades destes quadros também estão apresentados os códigos oriundos da Tab. 41).

Fig. 29 – Auxílio à identificação do nível de desempenho e de possíveis tipos de erro

O resultado deste cruzamento está apresentado nas tabelas a seguir, organizadas conforme o modelo SRK – a Tab. 42 traz as ações desempenhadas no nível de habilidade, a Tab. 43 traz as ações desempenhadas no nível de regra, e a Tab. 44 as ações desempenhadas no nível de conhecimento, sendo que cada tabela apresenta os tipos de erro possíveis no respectivo nível de desempenho – por conta

da sua extensão, a Tab. 43 foi apresentada no Apêndice B. Como pode ser observado, foi possível restringir o número / de tipos de erro associados a cada HEP – o estudo de sensibilidade apresentado na subseção 5.2.4 discute o impacto desta opção – partindo das descrições presentes nas fontes de dados e das observações apresentadas nas últimas colunas destas tabelas. Algumas correlações são evidentes (e.g., associar um erro de seleção às atividades de acionamento de botões em painéis com muitas opções), outras nem tanto (e.g., associar o problema de memória à prioridade dada a problemas considerados menos importantes). Além disto, observa-se que nem todos os dados selecionados na subseção 5.1.2 puderam ser aproveitados, em geral devido às dificuldades encontradas na associação dos tipos de erro. A seguir, apresenta-se uma breve discussão sobre estas questões para cada fonte de dados:

Tab. 42 – Cruzamento entre ações no nível de habilidade e os erros de Reason

Fonte	Ação	Descrição	Código	EG								l	Observações (baseadas nas descrições das ações apresentadas nas fontes)
				EG Ia	EG Ib	EG Ic	EG Id	EG Ie	EG If	EG Ig	EG Ih		
CREAM	Observação	O1 Observação de objeto errado	C_O1	X			X	X				3	1) Considerou-se que distrações e excesso de informação favorecem o erro; 2) Considerou-se que símbolos e sinais ambíguos/distrações favorecem o erro.
		O2 Identificação errada	C_O2			X	X					2	1) Considerou-se que fadiga e distrações favorecem o erro.
		O3 Observação não realizada	C_O3		X	X		X	X			4	1) Considerou-se que múltiplos sinais, barulho, falta de atenção, inadequação funcional, favorecem o erro; 2) Considerou-se que falta de atenção e inadequação funcional, favorecem o erro.
	Execução	E1 Tipo de ação errado	C_E1	X				X		X		3	
		E2 Ação no tempo errado	C_E2			X				X	X	3	
		E3 Atuação no objeto errado	C_E3	X			X					3	
		E4 Ação fora de sequência	C_E4			X		X		X	X	4	
		E5 Falta de ação	C_E5		X	X			X			3	
HEART	D	Tarefa bastante simples realizada rapidamente ou dando pouca atenção	H_D	X	X		X						1) Considerou-se uma ação de realização rotineira, sem raciocínio elaborado; 2) Ação bastante simples e realizada rapidamente, mas que pode ser impactada pela falta de atenção aos sentidos; 3) Foi desconsiderada a hipótese de vários passos.
	E	Tarefa rotineira, muito treinada/praticada, ou rápida envolvendo relativamente um baixo nível de habilidade	H_E	X	X							2	1) Considerou-se uma ação de realização rotineira, sem raciocínio elaborado; 2) Ação bastante simples e realizada rapidamente e por se tratar de ação muito praticada, alguma falta de atenção aos sentidos é pouco impactante; 3) Foi desconsiderada a hipótese de vários passos.
THERP	Tab. 20-7	5 Omissão de item de instrução (uso de material escrito)	T_7_5	X			X	X	X	X	X	5	1) Possibilidade de omissão depois de interrupção; 2) Estão sendo considerados vários passos; 3) Está sendo considerado que a ordem é importante.
	Tab. 20-8	Lembrar itens de instrução oral não escrita	T_8_7a		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos; 3) A ordem não é importante.
			T_8_7b		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
			T_8_7c		X	X		X	X	X	X	6	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
			T_8_8a		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos; 3) A ordem não é importante.
			T_8_8b		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
			T_8_8c		X	X		X	X	X	X	6	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
			T_8_9a		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos; 3) A ordem não é importante.
			T_8_9b		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
			T_8_9c		X	X		X	X	X	X	6	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
			T_8_10a		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos; 3) A ordem não é importante.
			T_8_10b		X	X		X	X			4	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
			T_8_10c		X	X		X	X	X	X	6	1) Está sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o uso dos sentidos.
	Tab. 20-9	Seleção de mostrador (para leitura quantitativa ou qualitativa)	T_9_2	X			X					2	
			T_9_3	X			X					2	
			T_9_4	X			X					2	
	Tab. 20-10	9 Ler e recordar informações de mostrador não anunciado	T_10_9		X	X		X	X	X	X	6	1) Esta sendo considerado que indivíduo só substituirá item por ação semelhante; 2) Está sendo desconsiderado o erro no uso dos sentidos.
	Tab. 20-12	Operação manual de controle	T_12_11	X			X					2	1) Não está sendo considerada omissão nesta ação.
			T_12_12	X			X					2	
	Tab. 20-13	Seleção de válvulas operadas localmente	T_13_1	X			X					2	1) Ação exige atenção extra; 2) Esta tabela considera erro de comissão; 3) Está sendo considerado apenas um passo; 4) A ordem não está sendo considerada.
			T_13_2	X			X	X				3	1) Ação exige atenção extra; 2) Esta tabela considera erro de comissão; 3) Proximidade de válvulas semelhantes favorece o erro; 4) Está sendo considerado apenas um passo; 5) A ordem não está sendo considerada.
			T_13_3	X			X					2	1) Ação exige atenção extra; 2) Esta tabela considera erro de comissão; 3) Está sendo considerado apenas um passo; 4) A ordem não está sendo considerada.
			T_13_4	X			X	X	X	X		5	1) Ação exige atenção extra; 2) Esta tabela considera erro de comissão; 3) Esta situação é considerada mais extrema, e pode exigir a consideração de mais ações para a identificação da válvula; 4) Proximidade de válvulas semelhantes favorece o erro; 5) Esta situação é considerada mais extrema, e pode exigir a consideração de mais ações para a identificação da válvula; 6) A ordem não está sendo considerada.
			T_13_5	X			X	X	X	X		5	

Tab. 44 – Cruzamento entre ações no nível de conhecimento e os erros de Reason

Fonte	Ação		Descrição	Código	EG_3a	EG_3b	EG_3c	EG_3d	EG_3e	EG_3f	EG_3g	EG_3h	EG_3i	EG_3jI	EG_3jII	EG_3jIV	EG_3jV	I	Observações (baseadas nas descrições das ações apresentadas nas fontes)			
CREAM	Interpretação	I1	Falha de diagnóstico	C_I1	X	X		X	X	X	X				X	X			9	1) Considera-se o enfrentamento de situações novas; 2) Podem ocorrer desvios cognitivos e situações novas; 3) Pode ocorrer falta de conhecimento e excesso de informações; 4) Analogias erradas são possíveis; 5) Podem ocorrer desvios cognitivos; 6) Sintomas podem ser confusos; 7) Pode exigir a consideração de muita informação.		
		I2	Erro de decisão	C_I2	X	X	X		X			X							5	1) Pode ocorrer falta de conhecimento e pressão social; 2) O operador pode apresentar medo dos resultados de sua ação; 3) Podem ocorrer distrações; 4) Pode ocorrer excesso de carga de trabalho e de estímulo; 5) Pode ocorrer falta de conhecimento.		
		I3	Interpretação atrasada	C_I3		X											X	X	3	1) Pode ocorrer pouca capacidade de memória de trabalho; 2) Pode haver concentração em outros fatores; 3) Pode haver concentração em outros fatores.		
	Planejamento	P1	Erro de Prioridade	C_P1	X	X				X		X							4	1) Foco do indivíduo influencia no objetivo do planejamento.		
		P2	Planejamento Inadequado	C_P2	X	X	X				X	X	X	X				X	X	9	1) Não foi considerado um processo de planejamento dinâmico.	
HEART	A	Totalmente não familiar realizada rapidamente sem noção real de possíveis consequências	H_A	X	X				X	X	X	X	X	X	X		X		10	1) Considera-se que não há tempo disponível para revisão; 2) Trata-se de ação não familiar; 3) Pode exigir a consideração de muitas informações, em relação ao curto tempo disponível; 4) Espera-se que indivíduo pondere causa e consequência; 5) Considera-se que o retorno não é imediato; 6) O tempo disponível para a execução é curto; 7) Considera-se que as informações a serem utilizadas estão disponíveis prontamente; 8) Considera-se que não há tempo disponível para acompanhar a evolução; 9) Considera-se que não há tempo disponível para a ocorrência de dispersão ou encasulamento.		
	C	Tarefa complexa que requer alto nível de compreensão e habilidade	H_C	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X		12	1) Considera-se a possibilidade de haver informações necessárias não disponíveis; 2) Trata-se de ação complexa; 3) Foi pressuposta compreensão e habilidade para a realização da ação; 4) Considera-se a possibilidade de a ação exigir comparações; 5) Espera-se que o indivíduo pondere causa e consequência; 6) Assume-se que o retorno para esta ação pode não ser imediato; 7) Pode exigir a consideração de muita informação.		
INTENT	Resposta definida pela equipe técnica	9	Conforme descrição na Tab. 38	I_9	X		X			X	X								4	1) Pode ocorrer falta de atenção aos detalhes; 2) O indivíduo pode não correlacionar causa e consequência adequadamente.		
		10	Conforme descrição na Tab. 38	I_10				X	X			X	X		X				5	1) Pode ocorrer o apego às opções iniciais de resposta; 2) O indivíduo pode não correlacionar diagnóstico e resposta adequadamente; 3) A valorização da resposta pode não ser independente; 4) O indivíduo pode ter ignorado o processo de desenvolvimento;		
		11	Conforme descrição na Tab. 38	I_11			X			X	X	X							4	1) Revisão pode ser errada; 2) Pode ocorrer a avaliação da correlação entre estados de forma errônea; 3) A avaliação de um objetivo interfere na avaliação do outro; 4) As informações relativas a um estado estão mais facilmente disponíveis nesta ação.		
		12	Notar sintomas e interpretar incorretamente	I_12	X		X	X			X				X	X	X		7	1) Pode ocorrer o apego às hipóteses iniciais de resposta; 2) Pode ocorrer correlação errada; 3) Pode exigir a consideração de muita informação; 4) Necessária interpretação de dados.		
		13	Ação correta tomada durante a evolução errada da planta	I_13				X	X	X	X									4	1) Pode ocorrer a valorização e apego ao estabelecido inicialmente; 2) Pode ocorrer o apego às opções iniciais de resposta; 3) Pode haver correlação errada; 4) Pode ocorrer a desconsideração de aspectos importantes.	
		14	Em situação de falha múltipla, a equipe resolve as menos importantes	I_14	X	X	X							X					X	X	6	1) O indivíduo pode subestimar a importância de situações mais relevantes; 2) Pode ocorrer o foco na questão errada; 3) O problema exige a consideração de muitos fatores; 4) Problemas com informação mais difícil podem estar sendo deixados por último.
THERP	Tabela 20-3	2	Diagnóstico em sala de controle	T_3_2	X		X	X	X		X	X							6	1) Passa a haver demanda de novos eventos; 2) Há necessidade de priorização; 3) Está sendo considerado que, para um único evento, a quantidade de informação é adequada (são feitas anotações, verificações, etc.).		
		3		T_3_3	X	X	X	X	X	X	X								6			
		4		T_3_4	X	X	X	X	X	X	X								6			
		5		T_3_5	X		X	X	X		X	X							6			
		6		T_3_6	X	X	X	X	X	X	X								6			
		8		T_3_8	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	
		9		T_3_9	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	
		10		T_3_10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	
		11		T_3_11	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	
		12		T_3_12			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	
		13		T_3_13	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	
		17		T_3_17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	15
		18		T_3_18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	15
		19		T_3_19	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	15
		20		T_3_20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	15
		21		T_3_21	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	15
Tabela 20-16	7a	Diagnóstico em sala de controle	T_16_1a	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	15	1) Grande quantidade de informações a serem consideradas.		
	7b	Diagnóstico em planta nuclear	T_16_1b	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	15			

- **CREAM:** para os dados apresentados na Tab. 36, os tipos de erro de Reason foram associados aos tipos de erro (consequentes das ações) correlacionados às funções humanas definidas por Hollnagel (1998), i.e., as falhas nas funções cognitivas foram associadas diretamente aos tipos de erro de Reason. Levando em consideração as características dos

respectivos tipos de erro – consequentes das ações (HOLLNAGEL, 1998) – , estas funções foram associadas aos níveis de desempenho do modelo SRK da seguinte forma: 1) *observação e execução*: nível de habilidade; 2) *interpretação e planejamento*: nível de conhecimento. Para encontrar as correlações mais prováveis, foram comparadas as descrições dos tipos de erro (ver Tab. 41) e as descrições das funções humanas apresentadas na CREAM (HOLLNAGEL, 1998). Estas correlações estão apresentadas na Tab. 42 e na Tab. 44 – ressalte-se que foram mantidas as correlações julgadas mais prováveis (pelo autor desta tese), ponderando as características dos diferentes tipos de erro considerados na CREAM, e as demais foram desconsideradas;

- **HEART**: as tarefas apresentadas na Tab. 37 foram associadas aos níveis de desempenho do modelo SRK da seguinte forma: 1) D e E: nível de habilidade – ver Tab. 42; 2) B, F G e H: nível de regra – ver Tab. 43 no Apêndice B; e 3) A e C: nível de conhecimento – ver Tab. 44. Em princípio, para encontrar os tipos de erro mais prováveis, foi aplicado o diagrama apresentado na Fig. 29 e, posteriormente, as descrições das tarefas foram comparadas com as características dos tipos de erro (resumidas na Tab. 41), sendo mantidas as correlações consideradas mais prováveis. A tarefa M foi desconsiderada nestas tabelas porque não foi possível associá-la a um nível de desempenho predominante;
- **INTENT**: os tipos de erro apresentados na Tab. 38 foram associados diretamente aos tipos de erro de Reason (resumidos na Tab. 41). De forma geral, os dados do INTENT associam uma situação a uma ação indesejada, sendo, portanto, expressões de disfunções cognitivas (GERTMAN et al., 1992). Os tipos de erro de Reason foram correlacionados aos dados do INTENT ponderando tanto as situações quanto os resultados indesejados, sendo as categorias associadas aos níveis de desempenho do modelo SRK da seguinte forma: 1) *consequência da ação, ações que levam à burla e dependência de recursos*: nível de regra – ver Tab. 43 no Apêndice B; e 2) *resposta definida pela equipe técnica*: nível de conhecimento – ver Tab. 44. Os tipos de erro 8 e 19, das categorias *ações que levam à burla e dependência de recursos*,

respectivamente, foram desconsiderados nestas tabelas porque não foram encontradas referências que permitissem sua associação aos níveis de desempenho, i.e., não foi possível associar um nível de desempenho predominante para estes erros;

- **TESEO:** não foi possível identificar uma correlação entre os dados apresentados na TESEO (Tab. 39) e disponíveis para este trabalho com os tipos de erro de Reason. Assim, estes dados não estão sendo considerados nesta primeira aplicação da TECHR;
- **THERP:** os dados da Tab. 40 (vide o Apêndice B) foram correlacionados aos três níveis de desempenho do modelo SRK. Para encontrar os tipos de erro mais prováveis em cada nível, foi aplicado o diagrama apresentado na Fig. 29 e, posteriormente, as descrições das ações foram comparadas com as características dos tipos de erro (resumidas na Tab. 41), sendo mantidas as correlações consideradas mais prováveis. Algumas tabelas da THERP (SWAIN; GUTTMANN, 1983) tiveram ações associadas em diferentes níveis (e.g., Tab. 20-7, item 1: nível de regra, e Tab. 20-7, item 5: nível de habilidade). As tabelas Tab. 20-1 e Tab. 20-2 não foram consideradas por serem baseadas em dados de outras tabelas (são empregadas em processo de triagem). Pelas seguintes razões, alguns itens de outras tabelas também não foram considerados: 1) base de dados é a mesma de outro item: a) Tab. 20-12, itens 2,3 e 4 em relação à Tab. 20-9; b) Tab. 20-11, item 1 em relação à Tab. 20-10, item 2; c) Tab. 20-5, itens 3 e 4 em relação à Tab. 20-5, itens 1 e 2, e; d) Tab. 20-3, itens 15 e 16 em relação à Tab. 20-3, itens 8; 2) não apresenta dado quantitativo (estes itens não foram apresentados na Tab. 40; vide o Apêndice B): a) Tab. 20-9, item 1; b) Tab. 20-10, item 8; c) Tab. 20-11, itens 7 e 8; d) Tab. 20-12, itens 1, 8a, 8b e 8c; e 3) aproximações do modelo: Tab. 20-3, itens 1, 7 e 14 – o tempo para a execução destas ações é considerado insuficiente (pode não ter ocorrido o erro humano).

5.2.3 Funções de probabilidades dos tipos de erro humano

A quantificação das probabilidades dos tipos de erro associados às fontes de

dados na subseção 5.2.2 foi feita por meio de RB, de forma semelhante ao exemplo apresentado no capítulo anterior – porém, para permitir o processamento uniforme de uma quantidade maior de informação, apresentando os estados dos nós segundo uma escala logarítmica. Este processo foi ilustrado de modo simplificado na Fig. 30, em três etapas. Assim, na Etapa 1, foram construídas as RB para cada ação, com o objetivo de estimar as funções de probabilidades dos tipos de erro nestas ações. Na Etapa 2, as estimativas para a função de probabilidades de cada tipo de erro foram combinadas para a obtenção de uma estimativa única para cada fonte. Por fim, na Etapa 3, foram construídas RB para cada tipo de erro, com o objetivo de obter a variabilidade de sua probabilidade, considerando as diferentes fontes às quais o tipo de erro foi associado. Na Fig. 30, as setas fazem referência ao fluxo de informação, sendo suprimidas as setas referentes às ações, erros e fontes não representadas nesta figura.

Como o processo de quantificação ilustrado na Fig. 30 é semelhante para cada fonte de dados e para cada tipo de erro, esta subseção apresenta como exemplo, nos tópicos a seguir: a) a obtenção da função de probabilidades para os tipos de erro associados à ação C_E1 (do CREAM, *execução: tipo de ação errado*) – EG_1a, EG_1e e EG_1h, conforme a Tab. 42 –; b) a obtenção da variabilidade da probabilidade do tipo de erro EG_1a (*deslize de dupla captura*) – após uma discussão sobre a obtenção da função densidade de probabilidade para um tipo de erro associado a uma fonte –, e; c) as estimativas para a variabilidade de todos os tipos de erro listado na Tab. 41.

Fig. 30 – Processo de quantificação das variabilidades dos tipos de erro

5.2.3.1 Função de probabilidades para os erros associados a uma ação

A RB para estimar as funções densidade de probabilidades dos tipos de erro associados à ação C_E1 está apresentada na Fig. 31. No preenchimento da TPC do nó “HEP na Ação” desta RB, considerada uma distribuição lognormal para a HEP, com mediana 3,00E-03 e EF igual a 3, conforme os valores apresentados na Tab. 36 – os valores para os parâmetros foram lançados nos nós determinísticos “N” ($\mu_y = -5.81$) e “T” ($\sigma_y = 0.67$), relativos à média e ao desvio padrão da distribuição normal associada (à distribuição lognormal com mediana 3,00E-03 e EF igual a 3), respectivamente. Os estados do nó “HEP na Ação” foram definidos de acordo com uma escala logarítmica, variando entre 0 e 1, conforme apresentados na Fig. 31. Assim, está sendo empregada uma função discreta para a HEP da ação, reproduzida na TPC para o nó “HEP na Ação” apresentada na Tab. 45 (coluna HEP), e pode ser visualizada graficamente na Fig. 31. O preenchimento da TPC do nó “P(Tipo de erro associado a C_E1)” foi realizado por meio da Eq. (80).

Tab. 45 – TPC para o nó “HEP na Ação” da RB da Fig. 31

T	N	HEP	P(HEP)	HEP	P(HEP)	HEP	P(HEP)	HEP	P(HEP)
0,67	-5,81	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-08	0,00E+00	1,00E-05	6,00E-17	6,00E-03	5,75E-02
		1,00E-10	0,00E+00	6,00E-08	0,00E+00	2,00E-05	2,13E-13	7,00E-03	3,78E-02
		2,00E-10	0,00E+00	7,00E-08	0,00E+00	3,00E-05	1,09E-11	8,00E-03	2,52E-02
		3,00E-10	0,00E+00	8,00E-08	0,00E+00	4,00E-05	1,43E-10	9,00E-03	1,70E-02
		4,00E-10	0,00E+00	9,00E-08	0,00E+00	5,00E-05	9,25E-10	1,00E-02	6,44E-02
		5,00E-10	0,00E+00	1,00E-07	0,00E+00	6,00E-05	3,91E-09	2,00E-02	5,33E-03
		6,00E-10	0,00E+00	2,00E-07	0,00E+00	7,00E-05	1,25E-08	3,00E-02	5,33E-04
		7,00E-10	0,00E+00	3,00E-07	1,18E-38	8,00E-05	3,28E-08	4,00E-02	8,33E-05
		8,00E-10	0,00E+00	4,00E-07	1,18E-38	9,00E-05	7,44E-08	5,00E-02	1,74E-05
		9,00E-10	0,00E+00	5,00E-07	2,95E-38	1,00E-04	8,28E-07	6,00E-02	4,45E-06
		1,00E-09	0,00E+00	6,00E-07	8,10E-37	2,00E-04	8,40E-05	7,00E-02	1,33E-06
		2,00E-09	0,00E+00	7,00E-07	1,26E-35	3,00E-04	5,38E-04	8,00E-02	4,46E-07
		3,00E-09	0,00E+00	8,00E-07	1,30E-34	4,00E-04	1,61E-03	9,00E-02	1,65E-07
		4,00E-09	0,00E+00	9,00E-07	9,85E-34	5,00E-04	3,31E-03	1,00E-01	3,63E-07
		5,00E-09	0,00E+00	1,00E-06	3,23E-32	6,00E-04	5,51E-03	2,00E-01	8,60E-10
		6,00E-09	0,00E+00	2,00E-06	4,02E-27	7,00E-04	7,98E-03	3,00E-01	1,07E-11
		7,00E-09	0,00E+00	3,00E-06	1,65E-24	8,00E-04	1,06E-02	4,00E-01	3,84E-13
		8,00E-09	0,00E+00	4,00E-06	9,43E-23	9,00E-04	1,31E-02	5,00E-01	2,55E-14
		9,00E-09	0,00E+00	5,00E-06	1,92E-21	1,00E-03	8,47E-02	6,00E-01	2,56E-15
		1,00E-08	0,00E+00	6,00E-06	2,07E-20	2,00E-03	2,46E-01	7,00E-01	3,47E-16
		2,00E-08	0,00E+00	7,00E-06	1,46E-19	3,00E-03	1,97E-01	8,00E-01	5,87E-17
		3,00E-08	0,00E+00	8,00E-06	7,58E-19	4,00E-03	1,34E-01	9,00E-01	1,19E-17
		4,00E-08	0,00E+00	9,00E-06	3,14E-18	5,00E-03	8,81E-02	1,00E+00	1,38E-18

A função densidade de probabilidades do tipo de erro apresentada na Eq. (80) é condicionada a l e hep , que são as variáveis representadas na RB da Fig. 31 como os nós pais do nó “P(Tipo de erro associado a C_E1)” – “L” e “HEP na Ação”, respectivamente. O nó “L” é determinístico e, para o caso de C_E1, foi igualado a 3 (já que são três os tipos de erro associados a esta ação, conforme a Tab. 42).

Fig. 31 – RB para a função de probabilidades dos tipos de erro para a ação C_E1

Para o preenchimento da TPC do nó “P(Tipo de erro associado a C_E1)”, a função contínua apresentada na Eq. (80) foi discretizada conforme a Eq. (104) – considerando os estados p_i para este nó, definidos de acordo com uma escala logarítmica, variando entre 0 e 1, conforme apresentados na Fig. 31. A TPC para este nó está parcialmente reproduzida na Tab. 46.

$$P(p_i|hep, l) = \begin{cases} \frac{p_{i+1} - p_{i-1}}{2} * fdp(p_i|hep, l), & p_i \neq 0, 1 \\ 5.10^{-11} * fdp(0|hep, l), & p_i = 0 \\ 5.10^{-2} * fdp(1|hep, l), & p_i = 1 \end{cases} \quad (104)$$

A estimativa das funções densidade de probabilidades dos tipos de erro associados à ação C_E1 é obtida diretamente da solução da RB na Fig. 31 para o nó “P(Tipo de erro associado a C_E1)”. Esta estimativa está reproduzida na Tab. 47 e pode ser visualizada graficamente na Fig. 31.

Tab. 46 – TPC para o nó “P(Tipo de erro associado a C_E1)” da RB da Fig. 31

Nós Pais		p									
HEP	L	0,00E+00	1,00E-10	2,00E-10	3,00E-10	4,00E-10	5,00E-10	6,00E-10	...	9,00E-01	1,00E+00
0,00E+00	3	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	...	0,00E+00	0,00E+00
1,00E-10		1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	...	0,00E+00	0,00E+00
2,00E-10		5,00E-01	5,00E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	...	0,00E+00	0,00E+00
3,00E-10		3,33E-01	4,44E-01	2,22E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	...	0,00E+00	0,00E+00
4,00E-10		2,50E-01	3,75E-01	2,50E-01	1,25E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	...	0,00E+00	0,00E+00
5,00E-10		2,00E-01	3,20E-01	2,40E-01	1,60E-01	8,00E-02	0,00E+00	0,00E+00	...	0,00E+00	0,00E+00
6,00E-10		1,67E-01	2,78E-01	2,22E-01	1,67E-01	1,11E-01	5,56E-02	0,00E+00	...	0,00E+00	0,00E+00
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9,00E-01		1,11E-10	2,22E-10	2,22E-10	2,22E-10	2,22E-10	2,22E-10	2,22E-10	...	0,00E+00	0,00E+00
1,00E+00		1,00E-10	2,00E-10	2,00E-10	2,00E-10	2,00E-10	2,00E-10	2,00E-10	...	2,00E-02	0,00E+00

5.2.3.2 Densidade de probabilidades de um tipo de erro associado a uma fonte

As ações apresentadas na Tab. 42 permitiram 15 estimativas da função densidade de probabilidades para o erro EG_1a, com dados de três fontes (CREAM, HEART e THERP). Para a estimativa da função densidade de probabilidade $P(p)_{Fonte}$ para a variável aleatória que representa a probabilidade de ocorrência de um dado tipo de erro a partir de uma dada fonte, as informações obtidas a partir de dados de diferentes ações estão sendo consideradas como resultantes de diferentes amostras de uma mesma subpopulação – i.e., cada fonte é representante de uma subpopulação. Assim, para cada fonte de dados, as estimativas foram combinadas (sendo desconsiderada qualquer prevalência entre as amostras), conforme a Eq. (105), onde n é referente ao número de estimativas na fonte (3 para a CREAM, 2 para a HEART e 10 para a THERP, conforme a Tab. 42). Os resultados desta combinação estão reproduzidos na Tab. 48.

$$P(p)_{Fonte} = \frac{\sum_{Ação} P(p)_{Ação}}{n} \quad (105)$$

Tab. 47 – Funções de probabilidades dos tipos de erro associados à ação C_E1

p	$P(p)_{C_E1}$	p	$P(p)_{C_E1}$	p	$P(p)_{C_E1}$	p	$P(p)_{C_E1}$
0,00E+00	4,12E-08	5,00E-08	8,24E-06	1,00E-05	4,50E-03	6,00E-03	9,94E-03
1,00E-10	8,24E-08	6,00E-08	8,24E-06	2,00E-05	8,13E-03	7,00E-03	5,87E-03
2,00E-10	8,24E-08	7,00E-08	8,24E-06	3,00E-05	8,08E-03	8,00E-03	3,35E-03
3,00E-10	8,24E-08	8,00E-08	8,24E-06	4,00E-05	8,02E-03	9,00E-03	1,6103
4,00E-10	8,24E-08	9,00E-08	8,24E-06	5,00E-05	7,97E-03	1,00E-02	1,62E-03
5,00E-10	8,24E-08	1,00E-07	4,53E-05	6,00E-05	7,91E-03	2,00E-02	1,45E-04
6,00E-10	8,24E-08	2,00E-07	8,24E-05	7,00E-05	7,85E-03	3,00E-02	1,43E-05
7,00E-10	8,24E-08	3,00E-07	8,24E-05	8,00E-05	7,80E-03	4,00E-02	2,17E-06
8,00E-10	8,24E-08	4,00E-07	8,24E-05	9,00E-05	7,74E-03	5,00E-02	4,50E-07
9,00E-10	8,24E-08	5,00E-07	8,24E-05	1,00E-04	4,23E-02	6,00E-02	1,23E-07
1,00E-09	4,53E-07	6,00E-07	8,24E-05	2,00E-04	7,13E-02	7,00E-02	4,40E-08
2,00E-09	8,24E-07	7,00E-07	8,24E-05	3,00E-04	6,57E-02	8,00E-02	1,87E-08
3,00E-09	8,24E-07	8,00E-07	8,24E-05	4,00E-04	6,03E-02	9,00E-02	7,31E-09
4,00E-09	8,24E-07	9,00E-07	8,24E-05	5,00E-04	5,51E-02	1,00E-01	2,39E-10
5,00E-09	8,24E-07	1,00E-06	4,53E-04	6,00E-04	5,01E-02	2,00E-01	2,49E-12
6,00E-09	8,24E-07	2,00E-06	8,23E-04	7,00E-04	4,55E-02	3,00E-01	5,25E-14
7,00E-09	8,24E-07	3,00E-06	8,23E-04	8,00E-04	4,12E-02	4,00E-01	2,38E-15
8,00E-09	8,24E-07	4,00E-06	8,22E-04	9,00E-04	3,72E-02	5,00E-01	1,77E-16
9,00E-09	8,24E-07	5,00E-06	8,22E-04	1,00E-03	1,84E-01	6,00E-01	1,88E-17
1,00E-08	4,53E-06	6,00E-06	8,21E-04	2,00E-03	1,37E-01	7,00E-01	2,50E-18
2,00E-08	8,24E-06	7,00E-06	8,21E-04	3,00E-03	6,26E-02	8,00E-01	3,48E-19
3,00E-08	8,24E-06	8,00E-06	8,20E-04	4,00E-03	3,15E-02	9,00E-01	2,77E-20
4,00E-08	8,24E-06	9,00E-06	8,19E-04	5,00E-03	1,72E-02	1,00E+00	0,00E+00

5.2.3.3 Variabilidade da probabilidade para um tipo de erro

Partindo das funções apresentados na Tab. 48 e da base apresentada no capítulo anterior, foi construída a RB apresentada na Fig. 32, que permite determinar a variabilidade $\phi(p)_{EG_1a}$ da probabilidade do erro EG_1a, e atualizá-la mediante uma evidência.

As TPC para os nós “CREAM”, “HEART” e “THERP” foram preenchidas com os dados apresentados na Tab. 48, considerando os valores de p entre 1,00E-06 e 9,00E-02 – sendo que a probabilidade de p estar neste intervalo é maior que 99,5%, i.e., $F(9,00E-02) - F(9,00E-05) > 99,5\%$. Assim, os valores de p determinaram os estados para estes nós, conforme apresentados na Fig. 32 – ressalte-se que as probabilidades para os estados dos nós desta RB são apresentadas em percentagem.

As TPC para os nós “EG_1a”, “Erros Observados”, “Observações” e “Peso da Subpopulação”, foram preenchidas de forma idêntica à apresentada no capítulo anterior, em relação aos nós equivalentes apresentados na RB da Fig. 27 daquele

capítulo – com exceção do nó “EG_1a” (equivalente ao nó “Sinais contrários e ausência de sinais”), os nós equivalentes são homônimos.

Tab. 48 – Função densidade de probabilidades do erro EG_1a em cada fonte

p	$P(p)_{CREAM}$	$P(p)_{HEART}$	$P(p)_{THERP}$	p	$P(p)_{CREAM}$	$P(p)_{HEART}$	$P(p)_{THERP}$
0,00E+00	2,34E-07	2,29E-09	6,24E-08	1,00E-05	2,03E-02	2,51E-04	6,43E-03
1,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	2,00E-05	3,17E-02	4,57E-04	1,10E-02
2,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	3,00E-05	2,81E-02	4,57E-04	1,05E-02
3,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	4,00E-05	2,54E-02	4,57E-04	1,01E-02
4,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	5,00E-05	2,32E-02	4,57E-04	9,80E-03
5,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	6,00E-05	2,14E-02	4,57E-04	9,53E-03
6,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	7,00E-05	1,99E-02	4,57E-04	9,29E-03
7,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	8,00E-05	1,86E-02	4,57E-04	9,08E-03
8,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	9,00E-05	1,75E-02	4,57E-04	8,89E-03
9,00E-10	4,67E-07	4,57E-09	1,25E-07	1,00E-04	9,04E-02	2,51E-03	4,42E-02
1,00E-09	2,58E-06	2,52E-08	6,86E-07	2,00E-04	1,14E-01	4,57E-03	6,96E-02
2,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	3,00E-04	8,60E-02	4,56E-03	6,20E-02
3,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	4,00E-04	6,69E-02	4,56E-03	5,57E-02
4,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	5,00E-04	5,32E-02	4,56E-03	5,03E-02
5,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	6,00E-04	4,27E-02	4,56E-03	4,57E-02
6,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	7,00E-04	3,46E-02	4,56E-03	4,17E-02
7,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	8,00E-04	2,79E-02	4,56E-03	3,83E-02
8,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	9,00E-04	2,25E-02	4,56E-03	3,54E-02
9,00E-09	4,67E-06	4,57E-08	1,25E-06	1,00E-03	9,79E-02	2,51E-02	1,35E-01
1,00E-08	2,57E-05	2,52E-07	6,86E-06	2,00E-03	6,09E-02	4,54E-02	1,25E-01
2,00E-08	4,68E-05	4,57E-07	1,25E-05	3,00E-03	2,63E-02	4,52E-02	7,08E-02
3,00E-08	4,68E-05	4,57E-07	1,25E-05	4,00E-03	1,31E-02	4,48E-02	4,30E-02
4,00E-08	4,68E-05	4,57E-07	1,25E-05	5,00E-03	7,19E-03	4,41E-02	2,75E-02
5,00E-08	4,68E-05	4,57E-07	1,25E-05	6,00E-03	4,22E-03	4,31E-02	1,84E-02
6,00E-08	4,68E-05	4,57E-07	1,25E-05	7,00E-03	2,54E-03	4,18E-02	1,30E-02
7,00E-08	4,68E-05	4,57E-07	1,25E-05	8,00E-03	1,49E-03	4,02E-02	9,60E-03
8,00E-08	4,67E-05	4,57E-07	1,25E-05	9,00E-03	7,58E-04	3,84E-02	7,48E-03
9,00E-08	4,67E-05	4,57E-07	1,25E-05	1,00E-02	1,11E-03	1,58E-01	9,43E-03
1,00E-07	2,57E-04	2,52E-06	6,86E-05	2,00E-02	2,33E-04	1,44E-01	1,58E-03
2,00E-07	4,66E-04	4,57E-06	1,25E-04	3,00E-02	6,11E-05	9,16E-02	2,72E-04
3,00E-07	4,64E-04	4,57E-06	1,25E-04	4,00E-02	2,39E-05	6,66E-02	6,95E-05
4,00E-07	4,63E-04	4,57E-06	1,25E-04	5,00E-02	1,17E-05	4,96E-02	2,36E-05
5,00E-07	4,62E-04	4,57E-06	1,25E-04	6,00E-02	6,44E-06	3,56E-02	9,76E-06
6,00E-07	4,60E-04	4,57E-06	1,25E-04	7,00E-02	3,78E-06	2,35E-02	4,66E-06
7,00E-07	4,59E-04	4,57E-06	1,25E-04	8,00E-02	2,19E-06	1,38E-02	2,60E-06
8,00E-07	4,58E-04	4,57E-06	1,25E-04	9,00E-02	1,11E-06	6,14E-03	1,74E-06
9,00E-07	4,56E-04	4,57E-06	1,25E-04	1,00E-01	1,64E-06	1,98E-04	8,26E-07
1,00E-06	2,50E-03	2,52E-05	6,85E-04	2,00E-01	3,04E-07	1,65E-07	1,43E-07
2,00E-06	4,43E-03	4,57E-05	1,24E-03	3,00E-01	6,07E-08	3,49E-09	3,25E-08
3,00E-06	4,31E-03	4,57E-05	1,24E-03	4,00E-01	1,70E-08	1,90E-10	1,03E-08
4,00E-06	4,20E-03	4,57E-05	1,23E-03	5,00E-01	5,73E-09	1,56E-11	3,90E-09
5,00E-06	4,11E-03	4,57E-05	1,23E-03	6,00E-01	2,10E-09	1,73E-12	1,64E-09
6,00E-06	4,01E-03	4,57E-05	1,22E-03	7,00E-01	7,47E-10	2,39E-13	7,04E-10
7,00E-06	3,93E-03	4,57E-05	1,21E-03	8,00E-01	2,24E-10	3,61E-14	2,74E-10
8,00E-06	3,85E-03	4,57E-05	1,21E-03	9,00E-01	3,67E-11	3,13E-15	5,79E-11
9,00E-06	3,77E-03	4,57E-05	1,20E-03	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

A variabilidade $\phi(p)_{EG_1a}$ estimada para a probabilidade do tipo de erro EG_1a é obtida diretamente da solução da RB na Fig. 32 para o nó “EG_1a”. Esta estimativa está reproduzida na Tab. 49 e pode ser visualizada graficamente na Fig. 32 – sendo apresentada em percentagem na RB.

Fig. 32 – RB para a variabilidade da probabilidade do erro EG_1a

5.2.3.4 Variabilidade da probabilidade para os erros listados na Tab. 41

O procedimento apresentado para a obtenção de $\phi(p)_{EG_1a}$ foi repetido para todos os tipos de erro apresentados na Tab. 41. Os resultados foram reproduzidos na Tab. 50, sendo apresentados os percentis de 5% e de 95%, as medianas, e as médias das variabilidades – o Apêndice C apresenta as distribuições completas.

Como na Tab. 41, na Tab. 50 os tipos de erro foram organizados de acordo com os níveis de desempenho propostos no modelo SRK. É interessante notar que a Tab. 50 revela algumas tendências gerais para a variabilidade das probabilidades dos tipos de erro nos diferentes níveis de desempenho. Ponderando os valores nesta tabela, é possível observar que:

- **Espalhamento:** na Tab. 50, as distribuições atribuídas aos erros associados ao desempenho humano no nível de conhecimento tendem a ser mais espalhadas (neste caso, o menor valor para o percentil 5% é 4,00E-07 e o maior valor para o percentil 95% é 1,00E-01) que as atribuídas aos erros associados aos demais níveis. O mesmo pode ser dito sobre os erros associados ao nível de regra (neste caso, o menor valor para o percentil 5% é 2,00E-06 e o maior valor para o percentil 95% é 1,00E-01) em relação aos associados ao nível de habilidade (neste caso, o menor valor para o percentil 5% é 3,00E-05 e o maior valor para o percentil 95% é 8,00E-02);
- **Médias:** as médias das probabilidades atribuídas são próximas – da ordem de 1,50E-02 para os níveis de regra e de conhecimento, e de 1,25E-2 para o nível de habilidade;
- **Medianas:** as medianas apresentam valores crescentes para os níveis na Tab. 50, i.e., da ordem de 2,00E-03 para o nível de habilidade, de 3,00E-3 para o nível de regra, e de 4,00E-3 para o nível de conhecimento.

Tab. 49 – Variabilidade para a probabilidade do tipo de erro EG_1a

p	$\phi(p)_{EG_1a}$	p	$\phi(p)_{EG_1a}$	p	$\phi(p)_{EG_1a}$
1,00E-06	1,07E-03	7,00E-05	9,89E-03	4,00E-03	3,36E-02
2,00E-06	1,90E-03	8,00E-05	9,39E-03	5,00E-03	2,63E-02
3,00E-06	1,86E-03	9,00E-05	8,94E-03	6,00E-03	2,19E-02
4,00E-06	1,83E-03	1,00E-04	4,57E-02	7,00E-03	1,91E-02
5,00E-06	1,79E-03	2,00E-04	6,29E-02	8,00E-03	1,71E-02
6,00E-06	1,76E-03	3,00E-04	5,08E-02	9,00E-03	1,55E-02
7,00E-06	1,73E-03	4,00E-04	4,24E-02	1,00E-02	5,61E-02
8,00E-06	1,70E-03	5,00E-04	3,60E-02	2,00E-02	4,85E-02
9,00E-06	1,67E-03	6,00E-04	3,10E-02	3,00E-02	3,07E-02
1,00E-05	9,00E-03	7,00E-04	2,70E-02	4,00E-02	2,22E-02
2,00E-05	1,44E-02	8,00E-04	2,36E-02	5,00E-02	1,66E-02
3,00E-05	1,30E-02	9,00E-04	2,08E-02	6,00E-02	1,19E-02
4,00E-05	1,20E-02	1,00E-03	8,60E-02	7,00E-02	7,85E-03
5,00E-05	1,12E-02	2,00E-03	7,70E-02	8,00E-02	4,59E-03
6,00E-05	1,05E-02	3,00E-03	4,74E-02	9,00E-02	2,05E-03

É importante ressaltar que estas observações apresentam caráter geral, e estão sendo apresentadas por serem relevantes para o desenvolvimento de um

modelo de triagem (e.g., definição dos limites quantitativos) – esta discussão é retomada com mais detalhes no próximo capítulo.

Tab. 50 – Variabilidade para os tipos de erro apresentados na Tab. 41

<i>Nível de Desempenho</i>	<i>Tipos de Erro</i>	<i>Percentil 5%</i>	<i>Mediana</i>	<i>Percentil 95%</i>	<i>Média</i>
Habilidade	EG_1a	3,00E-05	1,00E-03	4,00E-02	7,32E-03
	EG_1b	1,00E-04	7,00E-03	7,00E-02	1,72E-02
	EG_1c	8,00E-05	2,00E-03	7,00E-02	1,35E-02
	EG_1d	3,00E-05	1,00E-03	6,00E-02	1,08E-02
	EG_1e	3,00E-05	1,00E-03	6,00E-02	1,15E-02
	EG_1f	9,00E-05	3,00E-03	7,00E-02	1,44E-02
	EG_1g	5,00E-05	1,00E-03	8,00E-02	1,33E-02
	EG_1h	5,00E-05	1,00E-03	8,00E-02	1,32E-02
Regra	EG_2a	3,00E-05	2,00E-03	5,00E-02	9,79E-03
	EG_2b	2,00E-06	1,00E-03	9,00E-02	1,56E-02
	EG_2c	3,00E-05	2,00E-03	7,00E-02	1,28E-02
	EG_2d	4,00E-05	2,00E-03	1,00E-01	1,80E-02
	EG_2e	2,00E-05	1,00E-03	8,00E-02	1,53E-02
	EG_2f	3,00E-05	2,00E-03	9,00E-02	1,68E-02
	EG_2g	3,00E-06	1,00E-03	9,00E-02	1,52E-02
	EG_2h	2,00E-06	2,00E-03	9,00E-02	1,63E-02
	EG_2iI	9,00E-05	8,00E-03	9,00E-02	2,04E-02
	EG_2iII	8,00E-05	4,00E-03	7,00E-02	1,54E-02
Conhecimento	EG_2iIII	9,00E-05	6,00E-03	8,00E-02	1,72E-02
	EG_3a	3,00E-06	4,00E-03	8,00E-02	1,64E-02
	EG_3b	3,00E-06	3,00E-03	8,00E-02	1,44E-02
	EG_3c	3,00E-06	3,00E-03	4,00E-02	9,97E-03
	EG_3d	3,00E-06	5,00E-03	6,00E-02	1,42E-02
	EG_3e	3,00E-06	4,00E-03	9,00E-02	1,67E-02
	EG_3f	3,00E-06	5,00E-03	1,00E-01	2,23E-02
	EG_3g	3,00E-06	5,00E-03	9,00E-02	1,73E-02
	EG_3h	3,00E-06	5,00E-03	9,00E-02	1,69E-02
	EG_3i	2,00E-06	2,00E-03	8,00E-02	1,34E-02
	EG_3jI	4,00E-07	7,00E-03	1,00E-01	2,29E-02
	EG_3jII	3,00E-06	7,00E-03	1,00E-01	2,01E-02
	EG_3jIII	3,00E-06	5,00E-03	6,00E-02	1,42E-02
	EG_3jIV	1,00E-06	4,00E-03	9,00E-02	1,68E-02
	EG_3jV	1,00E-06	1,00E-03	3,00E-02	7,09E-03
	EG_3jVI	1,00E-06	1,00E-03	3,00E-02	7,09E-03

5.2.4 Análises do modelo

Para verificar o comportamento das variabilidades dos tipos de erro (apresentadas na Tab. 50) mediante alterações nas associações apresentadas na subseção 5.2.2, os modelos apresentados na subseção 5.2.3 foram submetidos a três análises, sendo obtidos os seguintes resultados:

- **Número l de erros associados a uma ação:** o aumento de l reduz a mediana e a média da função densidade de probabilidades para os tipos de erro associados a uma ação (considerando os erros que já estavam associados). Como exemplo, os dados apresentados na Tab. 47, para a ação C_E1, considerando l igual a 3, foram recalculados para considerar l igual a 4 e l igual a 8. Estes dados foram reproduzidos no gráfico da Fig. 33 (não foram apresentados alguns dados com probabilidades menores que $1,00E-3$) – as medianas e as médias estão reproduzidas no mesmo gráfico;
- **Associação de um tipo de erro a uma ação adicional:** a função densidade de probabilidades $P(p)_{Fonte}$ para um tipo de erro associado a uma fonte pode ter sua média e sua mediana alteradas tanto para valores maiores (caso a função para os tipos de erro nesta ação adicional apresente mediana/média maior que a já calculada para o erro referido) quanto para valores menores (caso a função para os tipos de erro nesta ação adicional apresente mediana/média menor que a já calculada para o erro referido), caso o tipo de erro seja associado a uma ação adicional da fonte. Para ilustrar esta situação, a ação C_O2 foi associada hipoteticamente ao erro EG_1a (o valor de l para esta ação passou de 2 para 3). Assim, a função $P(p)_{CREAM}$ apresentada na Tab. 48, para o tipo de erro EG_1a, foi recalculada. Estes dados foram reproduzidos no gráfico da Fig. 34 (não foram apresentados alguns dados com probabilidades menores que $1,00E-3$) – as medianas e as médias estão reproduzidas no mesmo gráfico;
- **Associação de todos os tipos de erro em um nível de desempenho:** se todas as ações classificadas no mesmo nível de desempenho fossem associadas a todos os tipos de erro relativos ao referido nível de desempenho, as variabilidades para estes tipos de erro seriam idênticas, i.e., as médias para estas variabilidades seriam $7,62E-03$ para os erros no nível de habilidade, $1,27E-02$ para os erros no nível de regra e $1,15E-02$ para os erros no nível de conhecimento – estes resultados podem ser verificados refazendo-se os cálculos apresentados na subseção 5.2.3 para um tipo de erro em cada nível de desempenho (considerando a associação deste erro a todas as ações classificadas no mesmo nível).

Fig. 33 – Função de probabilidades para os erros associados a C_E1

Fig. 34 – Função de probabilidades para o erro EG_1a na CREAM

Estas análises demonstram que, de forma geral, a atribuição de mais tipos de erro às ações tende a reduzir as médias das estimativas de probabilidades para os erros modelados – trazendo resultados menos conservadores. Comparando-se os resultados do tópico acima (“Associação de todos os tipos de erro em um nível de desempenho”) com os apresentados na Tab. 50, em somente sete casos (EG_1a, EG_1d, EG_1e, EG_2a, EG_3c, EG_3jV e EG_jVI) o aumento do número de erros resultou em acréscimo na média da variabilidade.

Neste ponto, é importante notar que as RB que deram origem aos resultados apresentados neste trabalho são baseadas em funções contínuas, que foram discretizadas para permitir um modelo atualizável para o desempenho humano. Os resultados apresentados podem ser aprimorados pela consideração de mais estados em cada nó das RB. As seguintes comparações (dos dados apresentados nos itens anteriores – obtidos das RB – com resultados de cálculos alternativos) exemplificam

esta observação:

- **Desvio no valor esperado para a HEP da ação:** e.g., a função para a ação C_E1 apresenta média igual a 3,91E-03 na RB da Fig. 31, nó “HEP na Ação”, enquanto os dados na Tab. 36 (linha referente ao tipo de erro E1), considerando uma distribuição lognormal contínua para a HEP, levam à média igual a 3,75E-03, calculada por meio da expressão do valor esperado da distribuição lognormal na Eq. (106) – onde μ_y e σ_y são os parâmetros da distribuição normal associada – representando um desvio de aproximadamente 4%. Considerando o dobro de estados para o nó “HEP na Ação” e mantendo a escala logarítmica, este desvio foi reduzido para aproximadamente 1% e, considerado um terço dos estados, verificou-se um desvio de 6%, aproximadamente;

$$E[hep] = e^{\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}} \quad (106)$$

- **Desvio no valor esperado para a probabilidade dos tipos de erro associados a uma ação:** o valor esperado para a probabilidade de um tipo de erro com função de densidade representada na Eq. (80), pode ser calculado pela relação apresentada na Eq. (107). Como exemplo, a Eq. (107) foi utilizada para calcular o valor esperado para a probabilidade dos tipos de erro associados à ação C_E1 (l igual a 3), dada a HEP igual a 6,00E-10, sendo obtido o valor 2,00E-10. A média para os valores apresentados na sétima linha da Tab. 46 é 1,95E-10 – representando um desvio de 3%, aproximadamente.

$$E[p|hep, l] = hep(l-1) \sum_{j=0}^{l-2} \binom{l-2}{j} \frac{(-1)^j}{j+2} = \frac{hep}{l} \quad (107)$$

Observa-se que os desvios discriminados não afetam os resultados relativos do modelo (comparação entre diferentes tipos de erro) ou a ordem de grandeza dos seus resultados.

5.3 COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO

No contexto de concepção de sistemas complexos, os modelos prospectivos de desempenho devem carregar as incertezas inerentes a esta fase do projeto e à falta de informação sobre o comportamento deste tipo de sistema. Como este conhecimento tende a crescer com o avanço do projeto, é esperado que os modelos desenvolvidos na fase de concepção, para sistemas deste tipo, sejam atualizados. O elemento humano pode ser uma parte fundamental de um sistema complexo, sendo que, ao longo dos anos, diversas técnicas de ACH foram desenvolvidas para analisar o seu desempenho.

Como apontado ao longo deste capítulo, a informação disponível nas técnicas de ACH – em especial seus dados quantitativos (e.g., derivados de simulação, experiência e opinião de especialistas) – pode ser explorada no desenvolvimento de um modelo atualizável para a predição do desempenho humano. A TECHR foi desenvolvida com o objetivo de aproveitar esta informação, para o desenvolvimento de um modelo de prospecção aplicável à fase de concepção de sistemas complexos e que possa ser atualizado frente às evidências encontradas durante a operação ou durante o projeto. Como parte da primeira aplicação desta técnica, este capítulo apresentou um procedimento para a seleção de dados e a primeira parte das RB que compõem o modelo atualizável para a prospecção do desempenho humano, quantificando a variabilidade da probabilidade para os diferentes tipos de erro modelados. Assim, estas RB trazem a base de dados para o modelo de desempenho, que terá a sua apresentação completada no próximo capítulo.

A seleção das fontes de dados levou em consideração a origem e a fiabilidade de sua base de dados, além de sua disponibilidade para este trabalho. A aplicação dos critérios de seleção, no entanto, não é considerada final, i.e., espera-se que esta base de dados seja atualizada na medida em que mais fontes sejam encontradas ou que mais informações sobre as fontes identificadas estejam disponíveis. Além de que, nem toda a informação apresentada nas fontes selecionadas foi empregada, i.e., foram aproveitados os dados básicos de confiabilidade (quantitativos ou qualitativos) de quatro técnicas de ACH – CREAM, HEART, INTENT e THERP – que puderam ser associados aos níveis de desempenho do modelo SRK e aos tipos de erro listados na Tab. 41 – a TESEO,

apesar de selecionada, não permitiu esta associação. Sendo assim, no modelo desenvolvido para estimar a variabilidade do desempenho humano, estas fontes de dados foram consideradas representativas de quatro subpopulações. Além disto, na mesma subpopulação, as diferentes estimativas para a função de probabilidades de um tipo de erro foram consideradas expressões de diferentes contextos, i.e., foram observadas com probabilidades diferentes porque o contexto de desempenho humano era diferente.

As RB do modelo de desempenho foram elaboradas de forma semelhante ao exemplificado no capítulo anterior. Contudo, para permitir o trabalho com dados representativos de diferentes ordens de grandeza, os nós para as probabilidades dos tipos de erro foram elaborados com estados baseados em uma escala logarítmica. As análises realizadas sobre este modelo – em especial sobre as variabilidades das probabilidades dos tipos de erro na Tab. 50 – permitiram verificar as tendências gerais dos seus resultados. Dentre outras observações, foi possível verificar que a complexidade atribuída aos níveis de desempenho do modelo SRK é refletida na incerteza sobre a probabilidade dos erros atribuídos em cada nível – assim, os dados resultantes para os erros nos níveis mais complexos são mais espalhados que nos níveis mais simples. Verificou-se também que, caso houvesse a atribuição de mais erros às ações de um nível de desempenho qualquer, a média da variabilidade dos erros deste nível seria reduzida, i.e., haveria a tendência de valores mais otimistas para as suas probabilidades.

Ressaltou-se neste capítulo que o modelo de desempenho humano em desenvolvimento traz características desejáveis para as modelagens na fase de concepção de sistemas complexos, ou seja: a) os resultados não são atrelados a um contexto específico de desempenho (foram calculados a partir de dados genéricos); b) os resultados são apresentados em distribuições que carregam tanto as incertezas epistemológicas quanto as incertezas inerentes ao desempenho humano; c) a apresentação em RB permite a atualização bayesiana do modelo (mediante novas informações).

6 APLICAÇÃO DA TECHR: MODELO PROSPECTIVO DE DESEMPENHO HUMANO

Este capítulo apresenta o equacionamento necessário para a combinação das funções de probabilidades de diversos tipos de erro e, com base neste equacionamento e no banco de dados apresentado no capítulo precedente, desenvolve um modelo prospectivo para o desempenho de ações humanas genéricas classificadas conforme critérios fundamentados na taxonomia de Bloom et al. (1956). Este capítulo também discute as formas de adequação deste modelo a diferentes condições – i.e., a sua alteração para a inclusão de novas informações – e traz um exemplo de atualização mediante evidências quantitativas sobre um tipo de erro considerado no modelo.

Assim, apresentam-se três seções para este capítulo: a) a primeira seção traz o equacionamento para a combinação das variabilidades dos tipos de erro para a obtenção das HEP das ações humanas genéricas consideradas no modelo de desempenho; b) a segunda, apresenta a taxonomia de Bloom (BLOOM et al., 1956; KRATHWOHL; BLOOM; MASIA, 1969; HARROW, 1972) – utilizada para caracterizar as ações genéricas a serem quantificadas no modelo de acordo com os seus domínios (cognitivo, afetivo e psicomotor) e categorias de ações humanas, e; c) a terceira, apresenta o desenvolvimento do modelo prospectivo – expondo a associação dos tipos de erro de Reason (1990) às ações genéricas modeladas e a obtenção de suas HEP – e traz uma discussão sobre o seu emprego, acompanhada pelo exemplo de atualização mencionado no parágrafo anterior.

6.1 COMBINAÇÃO DE DADOS

Por meio de um exemplo, esta seção apresenta o equacionamento utilizado para a combinação das curvas de probabilidades dos diferentes tipos de erro – descritas no capítulo anterior – para estimar a HEP de cada ação que compõe o modelo prospectivo de desempenho humano. Assim, em princípio, foi tomada uma ação hipotética A com HEP conhecida (igual a $1,00E-03$) à qual foram associados três tipos de erro α , β , e γ – um exemplo não hipotético pode ser conferido na

subseção 6.3.2 (para a obtenção da HEP na ação A_P_1 do modelo prospectivo obtido neste capítulo). As funções de probabilidades para estes tipos de erro puderam ser estimadas por meio da Eq. (80).

Sendo l igual a 3 (estão sendo considerados três tipos de erro) e hep igual a $1,00E-03$, foi obtida a Eq. (108) para a função densidade de probabilidade dos tipos de erro associados à ação A.

$$f_{dp}(p|1 * 10^{-3}, 3) = \begin{cases} 2 * 10^3 - 2 * 10^6 * p, & 0 \leq p < 1 * 10^{-3} \\ 0, & 1 * 10^{-3} \leq p \leq 1 \end{cases} \quad (108)$$

Este resultado pode ser utilizado para estimar a HEP para uma ação hipotética B, à qual são associados os tipos de erro α , β , e γ – os mesmos tipos de erro relacionados à ação A, considerando, entretanto, além do desconhecimento sobre a frequência relativa de ocorrência dos tipos de erro (vide a seção 4.1 Capítulo 4), a ausência de mais informações sobre a HEP na ação B – pela combinação das funções de probabilidades para estes erros. Ressalte-se que, na ausência de informações sobre a HEP na ação A, a curva obtida mais adiante para a HEP da ação B seria a mesma que a para a ação A, se fossem dadas as funções de probabilidades para os erros α , β , e γ conforme a Eq. (108). A subseção 6.1.1 ilustra a forma com que estas incertezas – além das imprecisões atribuídas à discretização das funções contínuas – são propagadas neste processo de combinação de dados.

Assumindo-se que os tipos de erro sejam mutuamente exclusivos, estabelece-se a relação apresentada na Eq. (109) – onde p_α , p_β , e p_γ são as probabilidades dos tipos de erro.

$$HEP = p_\alpha + p_\beta + p_\gamma \quad (109)$$

De outra forma, assumindo-se que os tipos de erro sejam independentes, estabelece-se a relação apresentada na Eq. (110), derivada da Eq. (111), onde $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ é um grupo finito de eventos – princípio de inclusão-exclusão (GRINSTEAD; SNELL, 2012).

$$HEP = p_\alpha + p_\beta + p_\gamma - (p_\alpha * p_\beta + p_\alpha * p_\gamma + p_\beta * p_\gamma) + p_\alpha * p_\beta * p_\gamma \quad (110)$$

$$P(a_1 \cup a_2 \cup \dots \cup a_n) = \sum_{i=1}^n P(a_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(a_i \cap a_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(a_i \cap a_j \cap a_k) - \dots \quad (111)$$

Nota-se que, para p_α , p_β , e p_γ pequenos, as estimativas da Eq. (109) e da Eq. (110) são próximas. Neste exemplo, o valor mínimo que pode ser assumido pela HEP da ação B é 0. Aplicando-se a Eq. (109), o valor máximo é a soma dos valores máximos que podem ser assumidos pelas probabilidades dos tipos de erro α , β , e γ , i.e., 3,00E-03 (igual a 1,00E-03 + 1,00E-03 + 1,00E-03). De outra forma, aplicando-se a Eq. (110), este resultado seria 2,997E-03.

Diferentemente da ação A , a HEP da ação B admite diferentes valores, considerados estimativas independentes e determinados pelas combinações de possíveis probabilidades para os tipos de erro associados à ação – e.g., conforme a Eq. (109) ou Eq. (110). Assim, dadas as funções densidade de probabilidades dos tipos de erro e considerando a Eq. (108), a probabilidade de cada combinação pode ser calculada por meio da Eq. (112).

$$P(p_\alpha + p_\beta + p_\gamma) = P(p_\alpha)P(p_\beta)P(p_\gamma) = fdp(p_\alpha)fdp(p_\beta)fdp(p_\gamma)d_{p_\alpha}d_{p_\beta}d_{p_\gamma} \quad (112)$$

Desta forma, a probabilidade de cada HEP da ação B é obtida por meio da Eq. (113).

$$P(hep) = \sum_{\forall p_\alpha, p_\beta, p_\gamma: hep=p_\alpha+p_\beta+p_\gamma} P(p_\alpha)P(p_\beta)P(p_\gamma) \quad (113)$$

Uma função aproximada para a probabilidade da HEP da ação B pode ser obtida de forma discretizada. Neste caso, como exemplo, os valores para p_α , p_β e p_γ podem ser assumidos como pertencentes ao conjunto de variáveis aleatórias discretas apresentado na Eq. (114).

$$p_\alpha, p_\beta, p_\gamma \in P_i = \{0; 0,0001; 0,0002; 0,0003; 0,0004; 0,0005; 0,0006; 0,0007; 0,0008; 0,0009; 0,001\} \quad (114)$$

Assim, as funções de probabilidades para os tipos de erro associados à ação B – Eq. (108) – podem ser aproximadas pela função reproduzida na Fig. 35.

Fig. 35 – Funções de probabilidades para P_α , P_β e P_γ

Para a obtenção da função reproduzida na Fig. 35, consideraram-se as relações apresentadas na Eqs. (115) e (116).

$$P(p) = f dp(p) \Delta_p \quad (115)$$

$$\Delta_p = \begin{cases} 5,00E - 05, & p = 0 \\ 1,00E - 04, & 0 < p < 0,001 \\ 5,00E - 05, & p = 0,001 \end{cases} \quad (116)$$

Desta forma, a Eq. (113) pode ser aplicada considerando a Eq. (115), sendo que os possíveis valores para HEP são pertencentes ao conjunto de variáveis aleatórias discretas representado na Eq. (117).

$$hep \in HEP = \{0; 0,0001; 0,0002; 0,0003; 0,0004; \dots; 0,0026; 0,0027; 0,0028; 0,0029; 0,003\} \quad (117)$$

Assim, a função de probabilidades para a HEP da ação B pode ser aproximada pela função reproduzida na Fig. 36. É interessante notar que os dados nesta curva se distribuem em torno de 1,00E-03, que é valor da HEP para a ação A .

Fig. 36 – Função de probabilidades para a HEP da ação B

Para o caso do modelo prospectivo de desempenho – que faz a combinação de dados concentrados em diferentes ordens de grandeza (vide a seção 6.3) – é conveniente a consideração dos possíveis valores para as probabilidades dos tipos de erro segundo uma escala logarítmica. O gráfico da Fig. 37 traz a função de probabilidades para os valores de p_α , p_β e p_γ escolhidos desta forma – apresentados na abscissa deste gráfico.

Fig. 37 – Funções de probabilidades para P_α , P_β e P_γ (escala logarítmica)

Para a obtenção da função reproduzida na Fig. 37, consideraram-se a Eq. (115), a Eq. (108) e as relações apresentadas na Eq. (118).

$$\Delta_p = \begin{cases} 5,00E - 7, & p = 0 \\ 1,00E - 6, & 0 < p < 1,00E - 5 \\ 5,50E - 6, & p = 1,00E - 5 \\ 1,00E - 5, & 1,00E - 5 < p \leq 1,00E - 4 \\ 5,50E - 5, & p = 1,00E - 4 \\ 1,00E - 4, & 1,00E - 4 < p \leq 1,00E - 3 \\ 5,00E - 5, & p = 1,00E - 3 \end{cases} \quad (118)$$

Considerando as combinações de p_α , p_β e p_γ , a Eq. (110) foi utilizada para encontrar os possíveis valores que a HEP da ação B pode assumir. Utilizando os resultados da Eq. (115), a Eq. (113) foi aplicada para encontrar a probabilidade relativa a cada combinação. Assim, a função de probabilidades para a HEP da ação B pode ser aproximada pela função reproduzida na Fig. 38.

A função apresentada na Fig. 38 foi elaborada agrupando os possíveis valores para a HEP nos elementos pertencentes ao conjunto de variáveis aleatórias discretas HEP' representado na Eq. (119).

$$HEP' = \{0, 1 * 10^{-6}, 2 * 10^{-6}, 3 * 10^{-6}, 4 * 10^{-6}, \dots, 8 * 10^{-4}, 9 * 10^{-4}, 1 * 10^{-3}, 2 * 10^{-3}, 3 * 10^{-3}\} \quad (119)$$

Fig. 38 – Função de probabilidades para a HEP da ação B (escala logarítmica)

A probabilidade de cada elemento de HEP' foi calculada segundo a Eq. (120).

$$P(hep') = \sum_{\{hep : hep' - \Delta_{h1} < hep \leq hep' + \Delta_{h2}\}} P(hep) \quad (120)$$

Na Eq. (120), Δ_{h1} e Δ_{h2} são tomados da Tab. 51. Nesta tabela, os valores de Δ_{h1} e Δ_{h2} são definidos de acordo com o intervalo que contém hep' , apresentado na primeira coluna.

Tab. 51 – Δ_{h1} e Δ_{h2} , de acordo com o intervalo de hep'

hep'	Δ_{h1}	Δ_{h2}
$hep' = 0$	0	5,00E-07
$0 < hep' < 1,00E-05$	1,00E-06	1,00E-06
$hep' = 1,00E-05$	5,00E-07	5,00E-06
$1,00E-05 < hep' < 1,00E-04$	1,00E-05	1,00E-05
$hep' = 1,00E-04$	5,00E-06	5,00E-05
$1,00E-04 < hep' < 1,00E-03$	1,00E-04	1,00E-04
$hep' = 1,00E-03$	5,00E-05	5,00E-04
$1,00E-03 < hep' < 3,00E-03$	1,00E-03	1,00E-03
$hep' = 3,00E-03$	5,00E-02	0

6.1.1 Desvios na recuperação da distribuição para a HEP de uma ação

Para avaliar os desvios neste processo de combinação de dados, foram definidas três ações humanas hipotéticas com características de HEP diferentes. Assim, o procedimento de combinação de dados descrito nos parágrafos anteriores foi aplicado para o caso de três ações hipotéticas C, D e E, com distribuições para as respectivas HEP baseadas em distribuições lognormais com os parâmetros indicados na Tab. 52. Estas distribuições foram utilizadas como referência para

gerar as distribuições para as HEP destas ações, sendo obtidas as distribuições discretas apresentadas em vermelho na Fig. 39 (para a ação C), na Fig. 40 (para a ação D), e na Fig. 41 (para a ação E) – indicadas por “original” nas legendas destas figuras. As médias e as medianas para as distribuições discretas também foram apresentadas na Tab. 52. Nota-se que a distribuição para a ação C é mais espalhada (com HEP significativas em diferentes ordens de grandeza) em relação às distribuições para as demais ações, e que a distribuição para a ação D apresenta mediana mais próxima de 1. Desta forma, as distribuições para as ações C e D representam as condições mais extremas encontradas nesta aplicação (vide o Capítulo 5).

Tab. 52 – Parâmetros para as distribuições das HEP das ações hipotéticas

Ação	C	D	E
<i>Referência</i> — <i>Mediana</i>	1,00E-04	9,00E-01	1,00E-03
<i>Fator de Erro (EF)</i>	30	10	3
<i>Discretas*</i> — <i>Média</i>	8,39E-04	4,18E-01	1,23E-03
<i>Mediana</i>	9,12E-05	3,24E-01	9,12E-04
(*) Utilizadas na análise

Fig. 39 – Função de probabilidades para a HEP da ação C

Fig. 40 – Função de probabilidades para a HEP da ação D

Fig. 41 – Função de probabilidades para a HEP da ação E

Ressalte-se que as distribuições apresentadas acima (em vermelho na Fig. 39, na Fig. 40, e na Fig. 41) não são a mera discretização das funções de referência (Tab. 52) – e.g., para a ação D, a média da função de referência é 9,00E-01, enquanto a função discretizada (utilizada nesta análise) apresenta mediana igual a aproximadamente 3,24E-01. Isto porque, para a obtenção das distribuições discretas, foram descartados os dados para HEP maiores que 1, verificados nas funções de referência.

As funções de probabilidade dos tipos de erro associadas às ações C, D e E foram obtidas para l igual a 2 e para l igual a 4 – i.e., em cada ação, as funções dos tipos de erro para cada HEP obtidas da Eq. (80) foram combinadas ponderando a probabilidade de ocorrência de cada HEP apresentada na distribuição original. Estas funções foram utilizadas para obter novamente as distribuições para as HEP das ações C, D e E. Assim, a função de probabilidade para os tipos de erro obtida de uma ação foi utilizada somente na recuperação da distribuição da HEP da mesma ação – e.g., para a recombinação da distribuição para a ação C, foi utilizada apenas a função de probabilidade dos tipos de erro obtida da distribuição original para a ação C (em vermelho na Fig. 39) e mantendo o número de tipos de erro igual a l (2 ou 4). As distribuições obtidas desta forma foram apresentadas juntamente com as distribuições originais na Fig. 39, na Fig. 40, e na Fig. 41 – para as ações C, D e E, respectivamente (em azul, quando foram associados 2 tipos de erro, e em preto, quando foram associados 4 tipos de erro).

Além dos resultados apresentados nas figuras anteriores (e.g., Fig. 39), a Tab. 53 compara as médias e as medianas das distribuições originais e das distribuições obtidas conforme o parágrafo anterior (recuperadas a partir das

funções de probabilidade para os tipos de erro).

Os resultados na Tab. 53 demonstram que para l maior, as distribuições recuperadas apresentaram médias e medianas maiores – sendo que, para l igual a 4, a mediana para a distribuição recuperada ultrapassa a mediana para a distribuição original. Ademais, as Figs. 39, 40 e 41 demonstram que, de forma geral, as distribuições recuperadas são menos achatadas que as distribuições originais (sendo menos espalhadas para l igual a 4) – ressalte-se que este resultado se reverte para distribuições originais mais concentradas (vide o exemplo na Fig. 38).

Tab. 53 – Comparação entre as distribuições recuperadas e originais

<i>Ação</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Original</i>	<i>L=2</i>	<i>L=4</i>
<i>C</i>	<i>Média</i>	8,39E-04	8,39E-04	8,68E-04
	<i>Mediana</i>	9,12E-05	1,10E-04	1,94E-04
<i>D</i>	<i>Média</i>	4,18E-01	4,11E-01	4,15E-01
	<i>Mediana</i>	3,24E-01	3,13E-01	3,28E-01
<i>E</i>	<i>Média</i>	1,23E-03	1,20E-03	1,20E-03
	<i>Mediana</i>	9,12E-04	9,06E-04	9,22E-04

Os desvios entre as distribuições recuperadas e as originais são atribuídos ao método de combinação e à discretização das funções contínuas de probabilidades – no emprego da Eq. (113), as probabilidades de erro de diferentes ordens de grandeza são combinadas para a obtenção da probabilidade de cada HEP e, em função da discretização, as probabilidades de erro pequenas contribuem para as HEP pequenas apenas quando combinadas com probabilidades de erro pequenas (desta forma, a distribuição recuperada tende a apresentar HEP pequenas menos significativas que a original: vide o exemplo na Fig. 39); no outro extremo, são descartadas as combinações de probabilidades de erro que resultam em HEP maiores que 1 [vide a Eq. (109)] –, de forma que, para distribuições originais mais espalhadas e/ou com valores medianos mais próximos de 1, as diferenças entre as formas das distribuições são mais acentuadas. Entretanto, os resultados apresentados nesta seção demonstram que as médias e as medianas (das distribuições recuperadas e originais) apresentam ordens de grandeza comparáveis (mesmo para os casos extremos: e.g., ação *C* e ação *D*). Além disto, a obtenção de medianas maiores para as distribuições recuperadas quando são considerados l maiores (vide as Figs. 39, 40 e 41) demonstra que o método de combinação proposto tende a resultados conservadores para as medianas – considerando que serão feitas combinações de funções de probabilidades de tipos de erro obtidas

tanto de distribuições de HEP associadas a poucos tipos de erro quanto de distribuições associadas a vários tipos de erro (vide a subseção 6.3.1).

6.2 AÇÕES HUMANAS: TAXONOMIA DE BLOOM

No desenvolvimento do modelo prospectivo de desempenho humano fez-se necessária a adoção de uma taxonomia para a ação humana, suficientemente detalhada para permitir a associação dos tipos de erro humano a diferentes contextos. A Taxonomia dos Objetivos Educacionais, também conhecida como taxonomia de Bloom (1956) – em referência a Benjamin S. Bloom, que dirigiu o grupo que compôs esta heurística (MUNZENMAIER; RUBIN, 2013) – permite estas correlações (vide a seção 6.3) e representa uma forma ampla, estruturada e compreensível para a classificação das ações humanas. A taxonomia de Bloom, no entanto, foi desenvolvida para categorizar os objetivos das experiências educacionais focando a capacitação esperada observável após a submissão do indivíduo a um processo de treinamento (BLOOM, 1956). A taxonomia de Bloom divide os objetivos educacionais em três domínios: cognitivo, afetivo e psicomotor. Nestes domínios, o aprendizado nos níveis mais altos depende da obtenção dos conhecimentos e habilidades classificados nos níveis mais baixos.

Originalmente, foram publicados dois volumes, referentes ao domínio cognitivo (BLOOM et al., 1956) e ao domínio afetivo (KRATHWOHL; BLOOM; MASIA, 1969). Outros autores propuseram taxonomias para o domínio psicomotor (HARROW, 1972; SIMPSON, 1966; DAVE, 1970). Ao longo dos anos foram propostas alterações a estes trabalhos originais (MUNZENMAIER; RUBIN, 2013; FERRAZ; BELHOT, 2010). Neste texto, as alterações a serem consideradas são as seguintes: 1) Anderson e Krathwohl (2001) propuseram uma revisão da taxonomia de Bloom para o domínio cognitivo (KRATHWOHL, 2002); e 2) Churches (2009) apresentou uma atualização das ações e processos descritos por Anderson e Krathwohl a fim de considerar situações que emergem do uso de tecnologias digitais, nomeadas ICT (do inglês *information and communication technologies*).

Nas subseções seguintes, cada domínio da taxonomia de Bloom será apresentado de forma resumida, salientando a classificação das ações, e

considerando as referências e alterações relevantes listadas no parágrafo anterior.

6.2.1 *Domínio cognitivo*

O domínio cognitivo se relaciona às ações centralizadas na lembrança de um conhecimento e no uso de habilidades intelectuais. Assim, no domínio cognitivo podem ser classificadas as ações resultantes de atividades psicológicas com função de conhecimento.

As categorias propostas inicialmente para este domínio são: conhecimento, compreensão, aplicação, análise, síntese, e avaliação (BLOOM et al., 1956). Anderson e Krathwohl (2001) propuseram uma revisão destas categorias, reorganizando este domínio nas dimensões “conhecimento” e “processo cognitivo”.

A dimensão “conhecimento” apresenta as seguintes categorias: efetivo, conceitual, procedimental, e metacognitivo, com as seguintes características:

- **Conhecimento Efetivo:** refere-se ao conhecimento que é básico para uma área de estudo: terminologia, fatos essenciais, elementos e detalhes específicos que o indivíduo precisa conhecer ou com o qual deve estar familiarizado para entender ou resolver um problema em um campo de estudo. Por exemplo, operadores devem conhecer o layout da planta;
- **Conhecimento Conceitual:** refere-se ao conhecimento das inter-relações entre os elementos básicos de uma estrutura que permitem que eles trabalhem juntos. Trata-se do conhecimento de classificações e categorias, princípios e generalizações, teorias, modelos, ou estruturas relacionadas a uma área específica. Por exemplo, o engenheiro responsável pelas turbinas em uma planta nuclear de potência deve conhecer o Ciclo de Rankine;
- **Conhecimento Procedimental:** refere-se ao conhecimento que auxilia o indivíduo a realizar algo específico a uma área de estudo. Trata-se do conhecimento de habilidades específicas e algoritmos, técnicas e metodologias específicas, ou critérios para determinar quando utilizar os procedimentos apropriados. Por exemplo, em uma planta nuclear de potência, os operadores precisam conhecer o procedimento de

desligamento de emergência;

- **Conhecimento Metacognitivo:** refere-se ao conhecimento de cognição de forma geral e à consciência do próprio pensamento e conhecimento. Trata-se do conhecimento estratégico, do conhecimento de tarefas cognitivas e do autoconhecimento. Por exemplo, na sala de controle de uma planta nuclear de potência, um operador conscientemente pesquisa em manuais e procedimentos a conveniência de uma ação ou sequência operacional.

A dimensão “processo cognitivo” apresenta as categorias lembrar, entender, aplicar, analisar, avaliar, e criar que totalizam 19 processos cognitivos, organizados do mais básico para o mais complexo (KRATHWOHL, 2002). Nesta dimensão, a descrição das categorias por verbos harmoniza-se com o interesse de utilizar a taxonomia de Bloom para a classificação de ações humanas observáveis. A Tab. 54 descreve as características de cada categoria e dos processos cognitivos e apresenta uma lista de ações que podem ser associadas a cada processo.

Ressalte-se que a Tab. 54 não apresenta as ações que compõem o processo cognitivo, mas as ações observáveis (como proposto pela taxonomia de Bloom), resultantes deste processo. Ademais, a última coluna refere-se ao código para o tipo de ação utilizado nos modelos quantitativos da TECHR – neste caso, o código é iniciado por A_C, utilizado no modelo prospectivo de desempenho humano para designar as ações desempenhadas no domínio cognitivo (conforme será detalhado na seção 6.3).

6.2.2 Domínio afetivo

O propósito original da taxonomia de Bloom é prover uma ferramenta para classificação dos objetivos educacionais. Se o objetivo é a mudança de atitude e comportamento individual, em vez de transmitir ou processar informação (BLOOM et al., 1956; ANDERSON; KRATHWOHL, 2001), o processo educacional deve ser estruturado de forma a avançar sobre o domínio afetivo. O domínio afetivo está relacionado às emoções e posturas, i.e., aos sentimentos, valores, interesses, motivações e atitudes individuais.

Tab. 54 – Categorias da dimensão “processo cognitivo” e ações humanas associadas

Tab. 34 – Categorias da dimensão "processo cognitivo" e ações humanas associadas							
Categoria	Descrição	Processos Cognitivos					
		Processo	Descrição	Ações Humanas			Código
Lembrar	Recuperar informações relevantes previamente aprendidas a partir da memória de longo prazo.	Reconhecer	Localizar na memória de longo prazo o conhecimento que é consistente com o material apresentado.	Discriminar Encontrar Etiquetar Identificar Listar	Localizar Nomear Ordenar Organizar	Pesquisar Relacionar Selecionar Sublinhar	A_C_1a
		Recordar	Recuperar o conhecimento relevante da memória de longo prazo.	Dar exemplo Descrever Escolher Lembrar	Recitar Recordar Recuperar	Repetir Reproduzir Saber	A_C_1b
		Interpretar	Alterar de uma forma de representação para outra.	Anotar Converter Reescrever Relatar Reconhecer	Recontar Revisar Reafirmar Pesquisar	Esclarecer Parafrasear Representar Traduzir	A_C_2a
Entender	Determinar o significado de informações orais, escritas ou gráficas. Demonstrar o entendimento de fatos pela exposição de ideias e conceitos.	Exemplificar	Encontrar um exemplo específico ou ilustração de um conceito ou princípio.	Ilustrar	Expressar	Descrever	A_C_2b
		Classificar	Determinar que algo pertença a uma categoria.	Categorizar Distinguir	Selecionar Instanciar	Subordinar	A_C_2c
		Resumir	Resumir um tema abrangente ou assunto maior.	Resumir Pedir	Abstrair Generalizar	Twitter	A_C_2d
		Inferir	Esboçar uma conclusão lógica partindo de informações apresentadas.	Concluir Extrapolar Interpolar	Predizer Calcular Estender	Estimar Defender Indicar	A_C_2e
		Comparar	Detectar correspondências entre duas ideias, objetos, etc.	Comparar Discutir Identificar	Localizar Observar	Contrastar Mapear	A_C_2f
		Explicar	Construir um modelo de causa e efeito de um sistema.	Construir modelo	Dizer		A_C_2g
		Aplicar	Realizar ou usar um procedimento em uma situação determinada. Usar informações em situações diferentes daquela de obtenção do conhecimento.	Executar	Realizar um objetivo ou cumprir uma ordem em situação conhecida.	Agendar Aplicar Arquivar Calcular Computar Demonstrar Desenhar Dirigir	Editar Empregar Executar Fazer Levar a cabo Listar Manipular
Implementar	Resolver problemas em novas situações pela aplicação de conhecimento, fatos, técnicas e regras.			Adaptar Alterar Completar Construir Descobrir Dramatizar Ensaiai Ensinar	Esboçar Escolher Escrever Experimentar Ilustrar Implementar Instalar Interpretar	Jogar (esporte) Modificar Predizer Produzir Programar Resolver Utilizar	A_C_3b
Diferenciar	Distinguir partes relevantes e irrelevantes ou partes importantes e não importantes de material apresentado.			Assinalar Centralizar Classificar Comparar Contrastar Decompor Discriminar	Distinguir Examinar Experimentar Identificar Inspeccionar Inventariar Ordenar	Questionar Selecionar Separar Subdividir Testar Recortar Elaborar mapa mental	A_C_4a
Analisar	Separar uma matéria em suas partes constituintes e determinar como as partes se relacionam, entre si e com o todo. Encontrar evidências que suportem generalizações.	Organizar	Determinar como os elementos funcionam ou se ajustam em uma estrutura.	Avaliar Contornar Debater Descobrir Diagramar Encontrar coerência	Esboçar Estruturar Agrupar Inferir Integrar Interrogar Investigar	Pesquisar Relacionar Resolver Sequenciar Vincular	A_C_4b
		Atribuir	Determinar o ponto de vista, os desvios, o valor ou o(s) propósito(s) básico(s) de um material apresentado.	Desconstruir Crítico Debater	Calcular Interpretar	Modelar Engenharia reversa	A_C_4c
		Verificar	Empregar um padrão de avaliação.	Comparar Coordenar Descrever	Detectar Discriminar Medir	Monitorar Testar Verificar	A_C_5a
Avaliar	Fazer julgamento baseado em critérios e padrões (determinados pelo indivíduo ou oferecidos a ele). Justificar uma decisão ou plano de ação.	Crítico	Avaliar quantitativa ou qualitativamente as opções (e.g., opiniões, materiais, métodos) por meio do julgamento das informações, validade das ideias ou qualidade do trabalho com base em um conjunto de critérios.	Apoiar Apreciar Argumentar Avaliar Colaborar Comentar Concluir Contrastar Crítico Debater Decidir	Defender Escolher Estimar Explicar Interpretar Julgar Justificar Moderar Pontuar (dar nota) Postar (opinião) Predizer	Priorizar Recomendar Refletir Relacionar Resumir Revisar Ritmar Selecionar Validar Verificar avaliação	A_C_5b
				Gerar	Apresentar hipóteses alternativas com base em um conjunto de critérios.	Explicar Formular Gerar Imaginar	Inferir Melhorar Predizer
Criar	Reorganizar os elementos em um novo padrão ou estrutura. Gerar novas ideias ou maneiras de ver as coisas. Propor soluções alternativas.	Planejar	Elaboração de um procedimento para a execução de alguma tarefa.	Categorizar Configurar Gerenciar	Juntar Organizar Preparar	Programar Projetar Rearranjar	A_C_6b
		Produzir	Inventar um produto.	Bloggar Combinar Compor Construir Criar Desenvolver	Dirigir Escrever Expor Fazer Filmar Inventar	Misturar Publicar Rearranjar Reconstruir Reunir Sintetizar	A_C_6c

As categorias propostas para este domínio são: receptividade, resposta, valorização, conceituação de valores, e interiorização de valores (KRATHWOHL; BLOOM; MASIA, 1969). Neste domínio, podem ser classificadas as ações que compõe o processo de formação de caráter, i.e., relacionadas a atitudes, valores e disposições.

A Tab. 55 descreve as características das categorias deste domínio e apresenta alguns exemplos de ações associadas. Nesta tabela as categorias são ordenadas por complexidade, i.e., ocorre um incremento de dificuldade e as categorias agregam as capacidades pertinentes às categorias anteriores (KRATHWOHL; BLOOM; MASIA, 1969).

Tab. 55 – Categorias do domínio afetivo e ações humanas associadas

<i>Categoria</i>	<i>Descrição</i>	<i>Ações Humanas</i>			<i>Código</i>
Receptividade	Acompanhar passivamente os fenômenos de interesse ou os estímulos específicos (instruções orais, textos, etc.). Focar a atenção, demonstrando, inclusive, abertura para novas experiências e disposição para ouvir. Ter consciência da ocorrência de um fenômeno ou da existência de algo.	Aceitar Anotar Assistir Comportar-se Concentrar-se Descrever Discutir Disponibilizar-se Doar-se Fazer	Focar Identificar Ler Localizar Mirar Nomear Ouvir Participar Querer	Reconhecer Requisitar Responder Reter Seguir Selecionar Sentir Solicitar Suportar	A_A_1
Resposta	Assistir e reagir a um fenômeno. Participar ativamente em uma atividade, demonstrando assertividade, desejo e/ou satisfação. Interessar-se pelos resultados de uma ação, sugerindo ideias e interpretações dos resultados. Questionar novas ideias, conceitos, modelos a fim de compreendê-los completamente. Conhecer as regras de segurança e praticá-las.	Aclamar Agradecer Ajudar Animar-se Aplaudir Apresentar Aprovar Assistir Clarificar Concordar	Conformar-se Contribuir Discutir Disponibilizar-se Dizer Escrever Etiquetar Excitar-se Exemplificar Interpretar	Praticar Procurar Questionar Reagir Realizar Recitar Reportar Responder Selecionar Voluntariar-se	A_A_2
Valorização	Valorizar objetos, fenômenos e comportamentos, i.e., decidir o valor e relevância das ideias e experiências. Sensibilizar-se para as diferenças individuais e culturais. Demonstrar preocupação com o bem estar de todos e assumir sua responsabilidade no funcionamento de um grupo. Internalizar um conjunto de valores específicos e expressá-los (expressar opiniões). Aceitar ou comprometer-se a determinada postura ou ação. Demonstrar habilidade para resolver conflitos.	Argumentar Auxiliar Desafiar Completar Comprometer-se Confrontar Crítico Debate Demonstrar Negar Diferenciar	Explicar Seguir Formar Aumentar a proficiência Iniciar Juntar Justificar Persuadir Propor	Protestar Ler Refutar Abandonar Reportar Selecionar Partilhar Estudar Apoiar Trabalhar	A_A_3
Conceituação de Valores	Organizar valores por prioridade, contrastando diferentes valores, resolvendo conflitos entre eles e criando um sistema único de valores. Qualificar e quantificar opiniões pessoais, expressar opiniões, razões e crenças. Aceitar a responsabilidade pelo próprio comportamento. Reconhecer a necessidade de balanço entre liberdade e comportamento responsável. Aceitar padrões de ética profissional. Reconhecer a importância do planejamento sistemático para a resolução de problemas.	Acomodar Aderir Alterar Arranjar Balancear Construir Combinar Comparar Completar	Contrastar Defender Desenvolver Explicar Formular Generalizar Identificar Integrar	Modificar Ordenar Organizar Preparar Priorizar Reconciliar Relacionar Sintetizar	A_A_4
Interiorização de Valores	Formar um sistema de valores (generalizado, consistente, previsível, característico e autossuficiente) que controle o comportamento. Revisar julgamentos e comportamentos à luz de novas evidências. Valorizar o “ser”, não o “parecer”.	Cooperar Cuidar do corpo Discriminar Influenciar Interpretar	Manter objetivos Modificar Mostrar Ouvir Praticar Propor Qualificar Questionar	Realizar Resolver Respeitar Revisar Servir Verificar	A_A_5

A última coluna da Tab. 55 refere-se ao código para o tipo de ação utilizado nos modelos quantitativos detalhados na seção 6.3 – neste caso, o código é iniciado por A_A, designando as ações desempenhadas no domínio afetivo.

6.2.3 Domínio psicomotor

O domínio psicomotor se relaciona às habilidades físicas do indivíduo. O grupo de Bloom não chegou a definir uma taxonomia para este domínio (FERRAZ; BELHOT, 2010). Seguindo a abordagem deste grupo, no entanto, outros autores propuseram taxonomias para o domínio psicomotor (HARROW, 1972; DAVE, 1970; SIMPSON, 1966). Na sequência, serão apresentadas resumidamente as propostas de Dave, Harrow e Simpson. Estas são as mais citadas na literatura.

6.2.3.1 Taxonomia de Dave

A proposta de Dave classifica os objetivos educacionais no domínio psicomotor em cinco categorias: imitação, manipulação, precisão, articulação e naturalização (DAVE, 1970). A Tab. 56 descreve as características destas categorias e apresenta como exemplo uma lista de ações associadas. Nesta tabela as categorias são ordenadas por complexidade, i.e., ocorre um incremento de dificuldade e as categorias agregam as capacidades pertinentes às categorias anteriores (DAVE, 1970). Nesta taxonomia, as categorias representam o nível de treinamento individual.

6.2.3.2 Taxonomia de Harrow

Para o domínio psicomotor, a proposta de Harrow (1972) classifica os objetivos educacionais em seis categorias: movimento reflexivo, movimento básico, habilidade perceptiva, habilidade física, movimento qualificado e comunicação não verbal. A Tab. 57 descreve as características destas categorias e apresenta uma lista de ações associadas. Nesta tabela as categorias são ordenadas de acordo com o grau de coordenação exigido, de respostas involuntárias a capacidades

aprendidas (HARROW, 1972). Nesta taxonomia, as categorias representam ações específicas.

Tab. 56 – Categorias do domínio psicomotor – Taxonomia de Dave

<i>Categoria</i>	<i>Descrição</i>	<i>Ações Humanas</i>		
Imitação	Observar e copiar as ações de outra pessoa.	<i>Aderir</i>	<i>Seguir</i>	<i>Repetir</i>
		<i>Juntar-se</i>	<i>Imitar</i>	<i>Replicar</i>
		<i>Tentar</i>	<i>Mudar</i>	<i>Reproduzir</i>
		<i>Iniciar</i>	<i>Observar</i>	<i>Responder</i>
		<i>Calibrar</i>	<i>Identificar</i>	<i>Seguir</i>
		<i>Executar</i>	<i>Organizar</i>	<i>Esboçar</i>
		<i>Construir</i>	<i>Praticar</i>	<i>Começar</i>
		<i>Copiar</i>	<i>Prosseguir</i>	<i>Tentar</i>
		<i>Dissecar</i>	<i>Reencenar</i>	<i>Voluntariar-se</i>
		<i>Duplicar</i>		
Manipulação	Realizar uma ação com auxílio de instrução ou memória.	<i>Adquirir</i>	<i>Construir</i>	<i>Implementar</i>
		<i>Montar</i>	<i>Desempenhar</i>	<i>Operar</i>
		<i>Construir</i>	<i>Executar</i>	<i>Realizar</i>
		<i>Conduzir</i>	<i>Executar</i>	<i>Recriar</i>
Precisão	Realizar uma ação com exatidão, agilidade, rapidez, confiabilidade, proporcionalidade e sem auxílio (interno ou externo) ou hesitação.	<i>Realizar</i>	<i>Exceder</i>	<i>Praticar</i>
		<i>Alcançar</i>	<i>Executar</i>	<i>Produzir</i>
		<i>Avançar</i>	<i>Melhorar</i>	<i>Progridir</i>
		<i>Aperfeiçoar</i>	<i>Manter</i>	<i>Alcançar</i>
		<i>Automatizar</i>	<i>Fazer</i>	<i>Refinar</i>
		<i>Calibrar</i>	<i>Manipular</i>	<i>Expor</i>
		<i>Completar</i>	<i>Dominar</i>	<i>Suceder</i>
		<i>Conduzir</i>	<i>Mostrar</i>	<i>Superar</i>
		<i>Controlar</i>	<i>Operar</i>	<i>Transcender</i>
		<i>Demonstrar</i>	<i>Aperfeiçoar</i>	<i>usar</i>
		<i>Fazer</i>	<i>Realizar</i>	
Articulação	Realizar duas ou mais ações combinadas sequencialmente de forma consistente. Adaptar e integrar a experiência para satisfazer um objetivo não padronizado, i.e., uma nova tarefa ou um novo contexto.	<i>Adaptar</i>	<i>Dominar</i>	<i>Rearranjar</i>
		<i>Alterar</i>	<i>Edificar</i>	<i>Reorganizar</i>
		<i>Mudar</i>	<i>Formular</i>	<i>Resolver</i>
		<i>Combinar</i>	<i>Melhorar</i>	<i>Revisar</i>
		<i>Construir</i>	<i>Integrar</i>	<i>Superar</i>
		<i>Coordenar</i>	<i>Dominar</i>	<i>Ensinar</i>
Naturalização	Realizar duas ou mais ações combinadas de forma consistente e com facilidade. Desempenhar a ação de forma automática e sem exercer esforço físico ou mental. Executar instintivamente (sem pensar) uma atividade e as habilidades relacionadas no nível estratégico. Definir objetivos, métodos e estratégias para o emprego das atividades para atender uma necessidade estratégica.	<i>Desenvolver</i>	<i>Modificar</i>	<i>Transcender</i>
		<i>Organizar</i>	<i>Especificar</i>	<i>Originar</i>
		<i>Combinar</i>	<i>Gerenciar</i>	<i>Projetar</i>
		<i>Compor</i>	<i>Inventar</i>	<i>Refinar</i>
		<i>Construir</i>	<i>Gerir</i>	<i>Transcender</i>
		<i>Criar</i>		

Tab. 57 – Categorias do domínio psicomotor – Taxonomia de Harrow

<i>Categoria</i>	<i>Descrição</i>	<i>Ações Humanas</i>			<i>Código</i>
Movimento Reflexivo	Reagir automaticamente (involuntariamente) a um estímulo. Movimentar-se reflexivamente – reflexos segmentares, intersegmentares e suprasegmentares (NOBACK et al., 2005).	<i>Reagir</i>	<i>Responder</i>		A_P_1
Movimento Básico	Mudar de posição, mover, realizar uma ação simples. Inclui os movimentos básicos que podem compor grupos mais complexos de movimentos fundamentais: movimento locomotor, não locomotor e manipulação.	<i>Levantar</i>	<i>Caminhar</i>	<i>Alcançar</i>	A_P_2
Habilidade Perceptiva	Responder às diferentes percepções sensoriais. Responder a um estímulo cinestésico, visual, auditivo, tátil ou um agrupamento de estímulos ambientais que permitem ao indivíduo ajustar seus movimentos.	<i>Pegar</i> <i>Escrever</i>	<i>Explorar</i>	<i>Distinguir utilizando os sentidos</i>	A_P_3
Habilidade Física	Atividades que requerem resistência, força, vigor e agilidade; que exigem maior desenvolvimento das habilidades físicas (resistência, força, flexibilidade e agilidade).	<i>Suportar</i> <i>Manter</i> <i>Repetir</i>	<i>Aumentar</i> <i>Melhorar</i> <i>Exceder</i>	<i>Desenvolver</i> <i>Forçar</i> <i>Controlar</i>	A_P_4
Movimento Qualificado	Executar atividades em que um bom nível de eficiência é exigido. Executar movimentos avançados. Executar e adaptar operações complexas e movimentos integrados.	<i>Dirigir</i> <i>Construir</i> <i>Malabarismos</i>	<i>Tocar um instrumento musical</i>	<i>Executar artesanato</i>	A_P_5
Comunicação Não-verbal	Produzir movimentos significativamente expressivos. Comunicar corporalmente de forma eficaz.	<i>Expressar sentimentos</i>	<i>Transmitir sentimentos</i>	<i>Expressar significado</i>	A_P_6

A última coluna da Tab. 57 refere-se ao código para o tipo de ação utilizado nos modelos quantitativos, conforme será detalhado na seção 6.3 – neste caso, o

código é iniciado por A_P, designando as ações desempenhadas no domínio psicomotor.

6.2.3.3 Taxonomia de Simpson

A taxonomia proposta por Simpson (1966) classifica os objetivos educacionais no domínio psicomotor em sete categorias: percepção, conjunto, resposta orientada, resposta mecânica, resposta complexa, adaptação e criação. A Tab. 58 descreve as características destas categorias e apresenta uma lista de ações associadas. Nesta tabela as categorias são ordenadas de acordo com o grau de coordenação exigido (SIMPSON, 1966). Nesta taxonomia, as categorias representam o grau de dificuldade das ações específicas.

Tab. 58 – Categorias do domínio psicomotor – Taxonomia de Simpson

<i>Categoria</i>	<i>Descrição</i>	<i>Ações Humanas</i>		
Percepção	Realizar ação sendo guiado por estímulo sensorial.	Escolher Descrever Detectar Diferenciar Distinguir Isolar Relacionar	Selecionar Separar Reconhecer Notar Tocar Ouvir	Sentir Detectar comunicação não verbal Controlar Ajustar
Conjunto	Prontidão mental, física e emocional para agir. Precondição que determina a resposta do indivíduo em diferentes situações.	Arranjar Começar Conhecer e Seguir um procedimento	Demonstrar motivação Explicar Mostrar Mover	Preparar Prosseguir Reagir Voluntariar-se
Resposta orientada	Primeiras tentativas de obter uma habilidade física (inclui imitação).	Aquecer Arrumar Calibrar Consertar Construir Copiar Corrigir Desmontar Dissecar	Esboçar Imitar Juntar Manipular Medir Misturar Mostrar Operar com orientação	Prender Reagir Reproduzir Responder Seguir instrução Tentar Traçar Triturar
Resposta mecânica	Estágio intermediário para a obtenção de uma habilidade física. Obtenção de proficiência básica. Desempenhar atividades motoras com alguma confiança e proficiência.	Aquecer Arrumar Calibrar Completar Construir Desmontar Dirigir um carro Esboçar	Fazer Desempenhar Fixar Juntar Manipular Medir Misturar Modelar Moer	Mostrar Organizar Remendar Reparar uma torneira com vazamento Usar um Computador Pessoal
Resposta complexa	Executar movimentos complexos com o mínimo de esforço desperdiçado e alto grau de autoconfiança. Executar automaticamente uma ação. O mesmo que “Resposta Mecânica”, mas com adjetivos indicando uma execução melhorada.	Aquecer Arrumar Calibrar Consertar Construir Coordenar Desmantelar Esboçar Manipular	Estacionar um carro em vaga apertada Medir Misturar Montar Mostrar Organizar	Operar um Computador com agilidade e precisão Prender Tocar piano com proficiência
Adaptação	Responder efetivamente a experiências inesperadas. As habilidades são bem desenvolvidas e o indivíduo é capaz de modificar movimentos para que se adéquem a situações específicas. Modificar instruções para se adequarem às necessidades. Realizar uma tarefa com um instrumento que não foi originalmente projetado para este fim.	Adaptar Alterar Mudar Rearranjar	Reorganizar Revisar Variar	Ajustar Integrar Dissolver
Criação	Criar novos padrões de movimentos para adequar-se a uma situação específica ou para solucionar um problema. Desenvolver e executar novas respostas e atividades.	Arranjar Combinar Compor Construir Construir nova teoria Criar	Criar uma nova rotina de exercícios Desenvolver um programa de treinamento Fazer	Formular Iniciar Modificar Originar Originar Projetar Solucionar problemas

6.2.3.4 Comparação entre as taxonomias propostas

Com base nas discussões apresentadas nos itens 6.2.3.1, 6.2.3.2 e 6.2.3.3, é possível comparar as taxonomias de Dave, Harrow e Simpson para o domínio psicomotor. Os pontos relevantes para este trabalho são os seguintes:

- As taxonomias de Dave e de Simpson centralizam-se na evolução do indivíduo, i.e., verifica-se claramente que as suas categorias relacionam-se mais ao grau de desenvoltura individual e menos aos tipos de atividade;
- Diferente das demais, a taxonomia de Simpson apresenta uma categoria específica para as atividades de preparação: categoria “Conjunto”;
- Diferente das demais, a taxonomia de Harrow apresenta uma categoria específica para a capacidade de expressão corporal: categoria “Comunicação Não-verbal”;

A evolução das habilidades psicomotoras ocorre por meio da prática repetida. As taxonomias propostas por Dave e Simpson focam esta questão, propondo categorias que consideram o estágio de evolução do indivíduo em relação à: precisão, velocidade, abrangência, procedimento e técnica. Uma ação específica, no entanto, poderia ser classificada em qualquer das três primeiras categorias da taxonomia de Dave ou das categorias de resposta da proposta de Simpson (“Resposta Orientada”, “Resposta Mecânica” e “Resposta Complexa”). Esta característica dificulta a exploração da taxonomia para a classificação de ações humanas.

Assim, considerando que na TECHR a taxonomia de Bloom será explorada como ponto de partida para a classificação de ações humanas, a proposta de Harrow apresenta-se como a mais adequada para o propósito deste trabalho.

6.3 MODELO PROSPECTIVO DE DESEMPENHO HUMANO

O modelo prospectivo de desempenho humano apresentado nesta seção foi construído com base na classificação das ações humanas proposta por Bloom et al. (1956) e na classificação dos erros humanos proposta por Reason (1990). Em princípio, as definições genéricas das ações (seção 6.2) foram correlacionadas às

descrições dos níveis de desempenho propostos no modelo SRK (RASMUSSEN; DUNCAN; LEPLT, 1987) e, então, as características dos tipos de erro foram correlacionadas aos tipos de ação. Assim, para cada ação e nível de desempenho, foram associados os tipos de erro considerados mais críveis. Na sequência, foram estimadas as HEP para cada ação genérica, pela combinação das funções de probabilidades dos tipos de erro associados à respectiva ação.

Além das bases de dados, este modelo de desempenho consiste na descrição das ações humanas, organizadas conforme a taxonomia de Bloom, dos tipos de erro associados a cada ação, e de estimativas das funções para as HEP de cada ação – estas ações são designadas como genéricas, em contraponto às ações das fontes de dados e às ações específicas, que são aquelas que devem ser modeladas e às quais se aplicam o modelo de desempenho (diretamente ou mediante uma alteração). As descrições das ações genéricas foram apresentadas na seção 6.2, e as subseções a seguir discutem o processo de construção do restante do modelo, seguidas de uma discussão sobre o seu emprego – considerando tanto a sua atualização numérica quanto a sua adaptação para a consideração de ações específicas.

6.3.1 Associação dos tipos de erro humano às ações humanas genéricas

No capítulo anterior, foram apresentados os tipos de erro de Reason (1990), organizados conforme os níveis de desempenho propostos no modelo SRK (RASMUSSEN; DUNCAN; LEPLT, 1987). Estes dados foram comparados com as descrições das ações genéricas apresentadas na taxonomia de Bloom, resultando nas associações apresentadas nas Tas. 59, 60 e 61 (discutidas nos itens a seguir) – nestas tabelas, a identificação dos tipos de erro é feita por meio do código obtido da Tab. 41. Assim, para cada ação e nível de desempenho, foram associados os tipos de erro considerados mais críveis – de acordo com a opinião do autor desta tese.

6.3.1.1 Domínio Afetivo

Assim como nos demais domínios da taxonomia de Bloom, as categorias do

domínio afetivo foram ordenadas de acordo com a evolução da complexidade de suas ações (da menor para a maior complexidade). Esta é uma proposta semelhante à classificação dos níveis de desempenho do modelo SRK. A Tab. 59 apresenta os tipos de erro associados às ações classificadas no domínio afetivo. De maneira geral, verifica-se nesta tabela, em um dado nível de desempenho, a associação de todos os tipos de erro. Isto é um reflexo da falta de detalhamento apresentada pelas categorias no domínio afetivo. Assim como na Tab. 60, a última coluna da Tab. 59 apresenta um resumo do que foi assumido para permitir a associação dos tipos de erro às respectivas ações (classificáveis na mesma categoria de ação).

Tab. 59 – Associação dos tipos de erro às ações no domínio afetivo

Categoria		Níveis de desempenho – Modelo SRK																				Observações
		Habilidade								Regra								Conhecimento				
		EG 1a	EG 1b	EG 1c	EG 1d	EG 1e	EG 1f	EG 1g	EG 1h	EG 2a	EG 2b	EG 2c	EG 2d	EG 2e	EG 2f	EG 2g	EG 2h	EG 2i	EG 2j	EG 2k	EG 2l	
Receptividade	A_A_1	X	X	X	X	X	X	X														A receptividade está sendo considerada pré-requisito para a execução de qualquer ação, sendo aprendida e treinada desde os primeiros estágios do aprendizado.
Resposta	A_A_2								X	X	X	X	X	X	X	X						Está sendo considerado que as ações de resposta se baseiam em regras, escritas ou não. Está sendo desconsiderada a hipótese de a regra apresentada ao executor estar errada.
Valorização	A_A_3																	X	X	X	X	Está sendo considerado apenas o processo racional de aquisição, conceituação e interiorização de valores. A complexidade destes processos não permitiu a exclusão de tipos específicos de erro.
Conceituação de Valores	A_A_4																	X	X	X	X	
Interiorização de Valores	A_A_5																	X	X	X	X	

6.3.1.2 Domínio Cognitivo

A Tab. 60 apresenta os tipos de erro associados às ações classificadas no domínio cognitivo. Neste domínio, as categorias da dimensão “conhecimento” não permitiram a classificação direta das ações humanas – foi proposta apenas uma correlação não conclusiva entre estas categorias e os níveis de desempenho do modelo SRK: a) conhecimento efetivo: nível de habilidade; b) conhecimento processual: nível de regra, e; c) conhecimento conceitual ou metacognitivo: nível de conhecimento. Assim, para classificar as ações humanas, foi empregada apenas a dimensão “processo cognitivo”, sendo correlacionados os erros de cada nível de desempenho. Na Tab. 60, a última coluna apresenta um resumo do que foi assumido para permitir a associação dos tipos de erro às respectivas ações.

Tab. 60 – Associação dos tipos de erro às ações no domínio cognitivo

Categoria		Processo Cognitivo		Níveis de desempenho – Modelo SRK																								Observações																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
				Habilidade								Regra								Conhecimento																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
				EG 1a	EG 1b	EG 1c	EG 1d	EG 1e	EG 1f	EG 1g	EG 1h	EG 2a	EG 2b	EG 2c	EG 2d	EG 2e	EG 2f	EG 2g	EG 2h	EG 2i	EG 2j	EG 2k	EG 2l	EG 2m	EG 3a	EG 3b	EG 3c		EG 3d	EG 3e	EG 3f	EG 3g	EG 3h	EG 3i	EG 3j	EG 3k	EG 3l	EG 3m	EG 3n	EG 3o	EG 3p	EG 3q	EG 3r	EG 3s	EG 3t																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Lembrar	Reconhecer	A_C_1a									X	X	X	X	X	X							X			X																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		</

6.3.1.3 Domínio Psicomotor

A Tab. 61 apresenta os tipos de erro associados às ações classificadas no domínio psicomotor. No preenchimento desta tabela, foram desprezados os processos cognitivos e afetivos envolvidos. Concentrando-se no movimento psicomotor, todas as categorias de ação deste domínio foram associadas ao desempenho no nível de habilidade. A última coluna da Tab. 61 apresenta um resumo do que foi assumido para permitir estas associações. O número de erros associados às diferentes categorias de ações é um reflexo do detalhamento incipiente destas categorias.

Tab. 61 – Associação dos tipos de erro às ações no domínio psicomotor

Categoria		Níveis de desempenho – Modelo SRK																								Observações																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		Habilidade						Regra												Conhecimento																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		EG_1a	EG_1b	EG_1c	EG_1d	EG_1e	EG_1f	EG_1g	EG_1h	EG_2a	EG_2b	EG_2c	EG_2d	EG_2e	EG_2f	EG_2g	EG_2h	EG_2i	EG_2j	EG_3a	EG_3b	EG_3c	EG_3d	EG_3e	EG_3f		EG_3g	EG_3h	EG_3i	EG_3j	EG_3k	EG_3l	EG_3m	EG_3n	EG_3o	EG_3p	EG_3q	EG_3r	EG_3s	EG_3t	EG_3u	EG_3v	EG_3w	EG_3x	EG_3y	EG_3z																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Movimento Reflexivo	A_P_1			X			X																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														

6.3.2 Quantificação das HEP das ações humanas genéricas

As HEP para os grupos de ações descritos na taxonomia de Bloom (vide a seção 6.2) foram estimadas considerando as variabilidades para os tipos de erro listados no Apêndice C e as associações apresentadas na subseção anterior. Esta quantificação foi feita por meio das equações apresentadas na seção 6.1 e pela aplicação do Método de Monte Carlo (MMC) (ROBERT; CASELLA, 2004) – a necessidade de aplicar um método aproximado para estimar as referidas HEP surgiu da impossibilidade de gerar um processo exato e rápido de cálculo e atualização para o uso na fase de concepção de sistemas, como será discutido mais adiante. Para exemplificar o que foi feito, será explicitada a obtenção da curva de probabilidades para a HEP da ação A_P_1, à qual foram associados apenas os tipos de erro EG_1c e EG_1f (vide Tab. 61). As variabilidades para estes tipos de erro estão reproduzidas na Tab. 62.

Tab. 62 – Variabilidade para os erros EG_1c e EG_1f

p	$\phi(p)_{EG_1c}$	$\phi(p)_{EG_1f}$	p	$\phi(p)_{EG_1c}$	$\phi(p)_{EG_1f}$	p	$\phi(p)_{EG_1c}$	$\phi(p)_{EG_1f}$	p	$\phi(p)_{EG_1c}$	$\phi(p)_{EG_1f}$
0,00E+00	3,52E-08	3,13E-08	5,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	1,00E-05	3,76E-03	3,34E-03	6,00E-03	2,19E-02	2,78E-02
1,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	6,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	2,00E-05	6,66E-03	5,90E-03	7,00E-03	1,79E-02	2,43E-02
2,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	7,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	3,00E-05	6,49E-03	5,74E-03	8,00E-03	1,53E-02	2,19E-02
3,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	8,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	4,00E-05	6,33E-03	5,58E-03	9,00E-03	1,35E-02	2,00E-02
4,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	9,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	5,00E-05	6,18E-03	5,44E-03	1,00E-02	6,43E-02	1,02E-01
5,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	1,00E-07	3,87E-05	3,44E-05	6,00E-05	6,04E-03	5,30E-03	2,00E-02	5,68E-02	9,03E-02
6,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	2,00E-07	7,03E-05	6,26E-05	7,00E-05	5,91E-03	5,17E-03	3,00E-02	2,38E-02	2,66E-02
7,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	3,00E-07	7,03E-05	6,26E-05	8,00E-05	5,78E-03	5,05E-03	4,00E-02	1,55E-02	1,57E-02
8,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	4,00E-07	7,03E-05	6,25E-05	9,00E-05	5,66E-03	4,93E-03	5,00E-02	1,14E-02	1,13E-02
9,00E-10	7,03E-08	6,26E-08	5,00E-07	7,03E-05	6,25E-05	1,00E-04	3,05E-02	2,65E-02	6,00E-02	8,65E-03	8,50E-03
1,00E-09	3,87E-07	3,44E-07	6,00E-07	7,02E-05	6,25E-05	2,00E-04	4,68E-02	3,97E-02	7,00E-02	6,79E-03	6,62E-03
2,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	7,00E-07	7,02E-05	6,25E-05	3,00E-04	4,09E-02	3,39E-02	8,00E-02	5,49E-03	5,32E-03
3,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	8,00E-07	7,02E-05	6,25E-05	4,00E-04	3,64E-02	2,96E-02	9,00E-02	4,57E-03	4,41E-03
4,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	9,00E-07	7,02E-05	6,25E-05	5,00E-04	3,28E-02	2,63E-02	1,00E-01	2,16E-02	2,08E-02
5,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	1,00E-06	3,86E-04	3,43E-04	6,00E-04	2,99E-02	2,36E-02	2,00E-01	1,08E-02	1,03E-02
6,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	2,00E-06	7,00E-04	6,22E-04	7,00E-04	2,73E-02	2,13E-02	3,00E-01	3,81E-03	3,61E-03
7,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	3,00E-06	6,98E-04	6,21E-04	8,00E-04	2,52E-02	1,95E-02	4,00E-01	1,45E-03	1,37E-03
8,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	4,00E-06	6,96E-04	6,19E-04	9,00E-04	2,32E-02	1,79E-02	5,00E-01	5,53E-04	5,21E-04
9,00E-09	7,03E-07	6,26E-07	5,00E-06	6,94E-04	6,17E-04	1,00E-03	1,15E-01	9,14E-02	6,00E-01	1,98E-04	1,86E-04
1,00E-08	3,87E-06	3,44E-06	6,00E-06	6,92E-04	6,15E-04	2,00E-03	1,02E-01	8,61E-02	7,00E-01	6,15E-05	5,78E-05
2,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	7,00E-06	6,90E-04	6,13E-04	3,00E-03	5,93E-02	5,57E-02	8,00E-01	1,45E-05	1,36E-05
3,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	8,00E-06	6,88E-04	6,11E-04	4,00E-03	3,90E-02	4,11E-02	9,00E-01	1,82E-06	1,71E-06
4,00E-08	7,03E-06	6,26E-06	9,00E-06	6,86E-04	6,09E-04	5,00E-03	2,82E-02	3,29E-02	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Como pode ser observado na Tab. 62, estão sendo considerados 92 possíveis valores para a probabilidade p de cada tipo de erro. Na aplicação direta do equacionamento proposto na seção 6.1 – Eq. (109) e Eq. (110) – fez-se necessária a consideração de 8464 combinações (922) para o levantamento da função de probabilidades para a HEP na ação A_P_1. Assim, seguindo o procedimento proposto na seção 6.1 (para a ação B) e tomando como possíveis para a HEP os mesmos valores considerados para as probabilidades p dos tipos de erro, foi obtida a função reproduzida na Tab. 63.

Tab. 63 – Função de probabilidades para a HEP na ação A_P_1

HEP	P(HEP)	HEP	P(HEP)	HEP	P(HEP)	HEP	P(HEP)
0,00E+00	1,00E-15	5,00E-08	2,20E-10	1,00E-05	4,22E-05	6,00E-03	3,44E-02
1,00E-10	4,00E-15	6,00E-08	2,64E-10	2,00E-05	7,89E-05	7,00E-03	3,01E-02
2,00E-10	9,00E-15	7,00E-08	3,08E-10	3,00E-05	1,21E-04	8,00E-03	2,69E-02
3,00E-10	1,30E-14	8,00E-08	3,52E-10	4,00E-05	1,57E-04	9,00E-03	2,46E-02
4,00E-10	1,80E-14	9,00E-08	3,96E-10	5,00E-05	1,92E-04	1,00E-02	1,46E-01
5,00E-10	2,20E-14	1,00E-07	4,37E-09	6,00E-05	2,24E-04	2,00E-02	1,18E-01
6,00E-10	2,60E-14	2,00E-07	8,37E-09	7,00E-05	2,55E-04	3,00E-02	5,59E-02
7,00E-10	3,10E-14	3,00E-07	1,32E-08	8,00E-05	2,84E-04	4,00E-02	3,35E-02
8,00E-10	3,50E-14	4,00E-07	1,76E-08	9,00E-05	3,12E-04	5,00E-02	2,35E-02
9,00E-10	4,00E-14	5,00E-07	2,20E-08	1,00E-04	3,18E-03	6,00E-02	1,77E-02
1,00E-09	4,38E-13	6,00E-07	2,64E-08	2,00E-04	5,15E-03	7,00E-02	1,39E-02
2,00E-09	8,37E-13	7,00E-07	3,08E-08	3,00E-04	6,86E-03	8,00E-02	1,13E-02
3,00E-09	1,32E-12	8,00E-07	3,52E-08	4,00E-04	7,83E-03	9,00E-02	9,36E-03
4,00E-09	1,76E-12	9,00E-07	3,95E-08	5,00E-04	8,51E-03	1,00E-01	4,55E-02
5,00E-09	2,20E-12	1,00E-06	4,36E-07	6,00E-04	8,98E-03	2,00E-01	2,16E-02
6,00E-09	2,64E-12	2,00E-06	8,33E-07	7,00E-04	9,29E-03	3,00E-01	7,86E-03
7,00E-09	3,08E-12	3,00E-06	1,31E-06	8,00E-04	9,49E-03	4,00E-01	3,12E-03
8,00E-09	3,52E-12	4,00E-06	1,74E-06	9,00E-04	9,61E-03	5,00E-01	1,17E-03
9,00E-09	3,96E-12	5,00E-06	2,17E-06	1,00E-03	7,56E-02	6,00E-01	4,05E-04
1,00E-08	4,37E-11	6,00E-06	2,60E-06	2,00E-03	7,49E-02	7,00E-01	1,25E-04
2,00E-08	8,37E-11	7,00E-06	3,02E-06	3,00E-03	6,28E-02	8,00E-01	3,06E-05
3,00E-08	1,32E-10	8,00E-06	3,44E-06	4,00E-03	4,96E-02	9,00E-01	3,72E-06
4,00E-08	1,76E-10	9,00E-06	3,86E-06	5,00E-03	4,06E-02	1,00E+00	1,14E-09

A função de probabilidades para a HEP na ação A_P_1 também foi obtida pelo MMC. Isto foi feito com base nas seguintes etapas, repetidas n vezes: 1) Escolha aleatória das probabilidades dos tipos de erro, segundo as distribuições apresentadas na Tab. 62; 2) Cálculo da HEP segundo a Eq. (110) considerando dois tipos de erro – utilizando os valores obtidos na etapa anterior (item 1); 3) Adição de uma unidade ao número de ocorrências relativo ao intervalo que contém a HEP calculada na etapa anterior (item 2) – a Eq. (119), a Eq. (120) e a Tab. 51 apresentam um exemplo de como foram definidos os intervalos considerados. A probabilidade aproximada para uma HEP possível foi tomada como a divisão do número de ocorrências – no respectivo intervalo – pelo número n de repetições. A Fig. 42 apresenta os resultados deste processo para n igual a 10^3 e n igual a $2 \cdot 10^7$, em confronto com o resultado apresentado na Tab. 63 (indicado como “Exato” na Fig. 42).

Fig. 42 – Funções de probabilidades para a HEP na ação A_P_1

Os dados apresentados na Fig. 42 apontam a convergência dos resultados para o aumento do número n de repetições, e demonstram a adequação do procedimento descrito no parágrafo anterior e do equacionamento empregado no MMC – este procedimento foi implantado na ferramenta computacional MATLAB®.

Este processo aproximado foi reproduzido para todas as ações apresentadas na subseção anterior (vide a Tab. 59, a Tab. 60 e a Tab. 61), considerando cada nível de desempenho (segundo o modelo SRK), sendo aplicadas $2 \cdot 10^7$ repetições (n igual a $2 \cdot 10^7$). Os resultados obtidos foram sintetizados na Tab. 64, onde são apresentados os percentis 5% e 95%, as medianas, e as médias das HEP para cada

ação genérica – as ações podem ser identificadas pelos códigos, que remetem às Tabs. 59, 60 e 61. O Apêndice D apresenta as distribuições completas.

Tab. 64 – HEP para as ações apresentadas na subseção 6.1

<i>Nível de Desempenho</i>	<i>Ação</i>	<i>Percentil 5%</i>	<i>Mediana</i>	<i>Percentil 95%</i>	<i>Média</i>
Habilidade	A_C_1b	8,00E-03	5,00E-02	3,00E-01	7,73E-02
	A_C_3a	1,00E-02	7,00E-02	3,00E-01	9,38E-02
	A_A_1	1,00E-02	7,00E-02	3,00E-01	9,38E-02
	A_P_1	7,00E-04	1,00E-02	1,00E-01	2,69E-02
	A_P_2	8,00E-03	5,00E-02	2,00E-01	7,20E-02
	A_P_3	1,00E-03	2,00E-02	1,00E-01	3,69E-02
	A_P_4	1,00E-02	6,00E-02	3,00E-01	8,40E-02
	A_P_5	1,00E-02	6,00E-02	3,00E-01	8,40E-02
	A_P_6	1,00E-02	6,00E-02	3,00E-01	8,40E-02
	A_C_1a	1,00E-02	7,00E-02	3,00E-01	9,69E-02
Regra	A_C_1b	5,00E-03	5,00E-02	2,00E-01	6,41E-02
	A_C_2a	9,00E-04	2,00E-02	2,00E-01	4,28E-02
	A_C_2c	4,00E-03	5,00E-02	2,00E-01	7,03E-02
	A_C_3b	1,00E-02	9,00E-02	3,00E-01	1,11E-01
	A_C_5a	4,00E-02	1,00E-01	4,00E-01	1,57E-01
	A_A_2	1,00E-02	9,00E-02	3,00E-01	1,11E-01
Conhecimento	A_C_1a	4,00E-04	1,00E-02	1,00E-01	2,55E-02
	A_C_2a	9,00E-04	1,00E-02	1,00E-01	2,74E-02
	A_C_2b	1,00E-02	6,00E-02	2,00E-01	7,47E-02
	A_C_2d	6,00E-03	4,00E-02	2,00E-01	5,90E-02
	A_C_2e	4,00E-02	1,00E-01	3,00E-01	1,39E-01
	A_C_2f	1,00E-02	6,00E-02	2,00E-01	7,02E-02
	A_C_2g	3,00E-02	1,00E-01	3,00E-01	1,29E-01
	A_C_4a	6,00E-03	4,00E-02	1,00E-01	5,17E-02
	A_C_4b	2,00E-02	1,00E-01	3,00E-01	1,10E-01
	A_C_4c	2,00E-03	3,00E-02	2,00E-01	5,29E-02
	A_C_5b	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01
	A_C_6a	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01
	A_C_6b	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01
	A_C_6c	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01
	A_A_3	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01
	A_A_4	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01
	A_A_5	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01

É interessante notar que algumas ações listadas na Tab. 64 foram associadas a um grande número de tipos de erro – e.g., ação A_A_5 da Tab. 59, à qual foram associados 15 diferentes tipos de erro. Nestes casos, o cálculo da função de probabilidades da HEP conforme proposto na seção 6.1 é inviabilizado pelo tempo computacional requerido – e.g., na ação A_A_5, seria necessário avaliar $2.86E+29$ combinações de probabilidades de tipos de erro (considerando 92 possíveis probabilidades para cada tipo de erro), e respectivas HEP –, que pode ser incompatível com a necessidade de aplicação do modelo prospectivo de desempenho em um contexto de concepção (e.g., pode ocorrer a necessidade de diversas atualizações do modelo durante o processo de projeto), e explica a adoção

de um método numérico aproximado (MMC) para este cálculo. Ressalte-se que mesmo para estas ações o emprego do MMC apresentou resultados convergentes para n menor que $2 \cdot 10^7$, de forma que os resultados apresentados na Tab. 64 (e no Apêndice D) foram considerados satisfatórios.

6.3.3 Emprego do modelo

O modelo prospectivo atualizável de desempenho humano obtido pela aplicação da TECHR – ao longo deste e dos capítulos anteriores – foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar o processo de concepção de sistemas considerando aspectos quantitativos de confiabilidade (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015). Neste sentido, o modelo apresentado pode ser utilizado tanto diretamente quanto como ponto de partida para um modelo específico, conforme as descrições:

- **Uso direto do modelo:** a) quando é necessária uma estimativa inicial da HEP, deve-se classificar a referida ação segundo a taxonomia de Bloom (vide seção 6.2), definir o nível de desempenho segundo o modelo SRK (vide a subseção 5.2.1), e tomar a distribuição apresentada na Tab. 64 para a ação genérica com a mesma classificação; b) quando é necessária a avaliação de muitas ações – e.g., em um processo de triagem –, de forma mais simples e mais conservadora, pode-se classificar a ação apenas segundo o nível de desempenho do modelo SRK – vide o item 5.2.3.4 em que são discutidas as tendências gerais das variabilidades dos erros em cada nível – e utiliza-se a distribuição apresentada na Tab. 64 para a ação genérica em que todos os erros do referido nível foram associados – e.g., ações A_C_3a, A_C_5a e A_C_5b, para os níveis Habilidade, Regra e Conhecimento, respectivamente, com os tipos de erros associados conforme a Tab. 60;
- **Emprego como ponto de partida para novos modelos:** nestes casos, podem ser consideradas: a) novas associações entre tipos de erros e ações; b) novas fontes de dados; e/ou c) ações que não puderam ser classificadas pela taxonomia de Bloom. Sobre estas formas de alteração, a

reconsideração das associações e a inclusão de uma nova base de dados tratam, portanto, da revisão de todo o modelo, devendo ser repetido o processo de construção apresentado ao longo desta tese. Um problema mais simples, no entanto, é a inclusão de uma ação que não possa ser classificada segundo a taxonomia de Bloom – não é necessária a revisão das associações dos erros às demais ações ou às fontes de dados.

Para facilitar a exposição das formas de atualização e dos efeitos de novas informações no modelo, foi elaborado o esquema do modelo de desempenho apresentado na Fig. 43. Neste esquema, os quadros superiores representam as fontes de dados, as respectivas ações e tipos de erros associados, organizados conforme o nível de desempenho, e incluem o processo de tratamento de dados – pelo qual são obtidas as curvas de probabilidades para os tipos de erros associados às ações de cada fonte de dados. Nos quadros centrais estão representados os tipos de erro, quantificados com base nas estimativas obtidas para cada fonte de dados, e organizados conforme o nível de desempenho do modelo SRK. Ainda nos quadros centrais, estão apresentados os pontos de inserção das evidências para cada tipo de erro – que podem ser obtidas na fase operacional do sistema, ou que podem propiciar a inserção de opiniões de especialistas ou dados coletados em simuladores. Nos quadros inferiores estão representadas as ações genéricas, organizadas conforme os domínios (da taxonomia de Bloom) e os níveis de desempenho de cada ação (do modelo SRK). Entre os quadros intermediários e os inferiores estão representadas as associações entre os erros e as ações genéricas.

Como pode ser observado no esquema apresentado na Fig. 43, o modelo de desempenho foi apresentado como a junção de três níveis – um para cada nível de desempenho do modelo SRK. O Nível de Conhecimento, o Nível de Regra e o Nível de Habilidade são apresentados em primeiro, segundo e terceiro planos, respectivamente. Ressalte-se que as setas representam (esquemáticamente) as associações referentes apenas ao Nível de Conhecimento.

O modelo de desempenho humano desenvolvido neste trabalho é integrado, de forma que a inclusão de novas informações pode significar a necessidade de atualizar uma parte significativa do modelo. O esquema na Fig. 43 ajuda a ilustrar as seguintes formas de alteração do modelo:

Fig. 43 – Esquema do modelo prospectivo atualizável de desempenho humano

- **A) Atualização mediante evidências sobre um tipo de erro:** isto pode ser feito diretamente nos nós apresentados nas RB que fazem o cálculo da variabilidade do respectivo tipo de erro – e.g., 4.2.2 –, na Fig. 43 estes nós estão representados na parte central do modelo (e.g., “Evidências para o tipo de erro a”). Neste caso, é necessário recalcular as distribuições para as HEP das ações genéricas na parte inferior do modelo;
- **B) Inclusão de uma nova fonte às bases de dados:** esta inclusão afeta todas as partes do modelo. Na parte superior é necessário agrupar as novas ações de acordo com os níveis de desempenho do modelo SRK, associar os tipos de erro às ações da fonte – referentes ao respectivo nível de desempenho –, calcular a variabilidade para as probabilidades dos erros nestas ações, calcular as variabilidades para as probabilidades dos erros na referida fonte. Na parte central, é necessário recalcular as variabilidades para os tipos de erro do modelo, acrescentando um novo nó nas RB referentes aos tipos de erro afetados. Na parte inferior, é necessário

recalcular as distribuições para as HEP das ações genéricas;

- **C) Inclusão de uma nova ação:** a inclusão de uma ação diferente das apresentadas no modelo afetará apenas a parte inferior, conforme o esquema na Fig. 43. De forma semelhante ao que foi feito para as ações já incluídas no modelo (vide as subseções 6.3.1 e 6.3.2), isto pode ser feito pela definição dos possíveis níveis desempenho para a ação, pela associação de tipos de erro em cada nível, e pelo cálculo da HEP da ação específica. Ressalte-se que, neste caso, não ocorre alteração nas estimativas das HEP das ações genéricas;
- **D) Alteração das associações dos tipos de erro às ações na base de dados:** estas associações estão representadas na Fig. 43 – sendo identificadas pela seta vermelha superior –, e foram feitas no estado da arte, conforme exposto no capítulo anterior. Caso ocorram, estas alterações afetarão todas as partes do modelo no respectivo nível de desempenho;
- **E) Alteração das associações dos tipos de erro às ações da taxonomia de Bloom:** estas associações estão representadas na Fig. 43 – sendo identificadas pela seta vermelha inferior –, e foram feitas no estado da arte, conforme exposto na subseção 6.3.1. Caso ocorram, estas alterações afetarão a parte inferior do modelo, com efeitos somente sobre as ações correlacionadas;
- **F) Alteração do nível de desempenho de uma ação da base de dados:** esta alteração afeta todas as partes do modelo, sendo equivalente à inclusão de uma nova ação em um nível de desempenho e a exclusão de uma ação em outro nível da mesma base de dados. Assim, dois níveis de desempenho terão os tipos de erro afetados, sendo necessária a atualização das estimativas para as suas variabilidades (parte central do modelo). O mesmo deve ser feito para as ações genéricas com HEP calculadas com base nestes tipos de erro (parte inferior do modelo);
- **G) Alteração do nível de desempenho de uma ação da taxonomia de Bloom:** esta alteração não afeta os dados das demais ações, sendo equivalente à inclusão de uma ação diferente das já apresentadas na taxonomia (vide a forma “C” de alteração do modelo). Para esta ação, será necessário rever as associações da ação aos tipos de erro.

Como exemplo, será apresentada uma alteração na forma “A” – isto é conveniente porque esta alteração não exige a reconsideração das associações entre os tipos de erro e ações do modelo. Assim, retomando o caso do tipo de erro EG_1a (“Deslize de dupla captura”), que teve a variabilidade estimada na RB da Fig. 32. Nesta RB são apresentados os nós “Erros Observados” e “Observações”, referentes ao número de erros do tipo EG_1a observados e ao número de oportunidades para a ocorrência deste tipo de erro, respectivamente. Considerando que foi observado 1 erro do tipo EG_1a (dado inserido no nó “Erros Observados”) em 100 oportunidades (dado inserido no nó determinístico “Observações”), esta RB pode ser atualizada conforme a Fig. 44.

Neste caso, como o erro EG_1a é observado no desempenho no nível de habilidade, as HEP para as ações genéricas classificadas neste nível e associadas a este erro podem ser atualizadas pela reaplicação do procedimento apresentado na subseção anterior (6.3.2), considerando, porém, a variabilidade a posteriori para o erro EG_1a, conforme apresentada no nó “EG_1a” da Fig. 44. Isto foi feito para as ações A_C_3a (vide Tab. 60), A_A_1 (vide Tab. 59), A_P_2, A_P_4, A_P_5, e A_P_6 (vide Tab. 61), de forma que, mediante as evidências apontadas no parágrafo anterior (observação de 1 erro do tipo EG_1a em 100 oportunidades), os respectivos dados da Tab. 64 podem ser revistos conforme os dados apresentados na Tab. 65.

Tab. 65 – Atualização das HEP para as ações apresentadas na subseção 6.1

<i>Nível de Desempenho</i>	<i>Ação</i>	<i>Percentil 5%</i>	<i>Mediana</i>	<i>Percentil 95%</i>	<i>Média</i>
Habilidade	A_C_3a	2,00E-02	7,00E-02	3,00E-01	9,45E-02
	A_A_1	2,00E-02	7,00E-02	3,00E-01	9,45E-02
	A_P_2	1,00E-02	5,00E-02	2,00E-01	7,26E-02
	A_P_4	1,00E-02	6,00E-02	3,00E-01	8,45E-02
	A_P_5	1,00E-02	6,00E-02	3,00E-01	8,45E-02
	A_P_6	1,00E-02	6,00E-02	3,00E-01	8,45E-02

Os dados alterados em relação à Tab. 64 foram hachurados na Tab. 65. Verifica-se o aumento dos percentis 5% para as ações A_C_3a, A_A_1 e A_P_2, e da média para todas as ações. Ressalte-se que, apesar de esperada, a alteração nos demais dados não foi observada. Isto se deve à forma discreta das funções de probabilidades das HEP destas ações – isto porque a mediana e os percentis foram escolhidos entre os possíveis valores da HEP (vide o exemplo da ação A_P_1 na Tab. 63), e o aumento foi insuficiente para alterar o valor que melhor representa estes parâmetros.

Fig. 44 – RB atualizada para a variabilidade da probabilidade do erro EG_1a

É interessante notar que todos os nós da RB na Fig. 44 foram afetados pelos dados inseridos como evidência. Por exemplo, o nó “Peso da Subpopulação” apresentava probabilidades (a priori) iguais a 33,33% – i.e., todas as subpopulações (fontes de dados) apresentavam a mesma probabilidade de representar a população

como um todo – e, dadas as evidências, estas probabilidades (a posteriori) passaram a 14,14% (CREAM), 57,63% (HEART), e 28,23% (THERP), aumentando a chance dos dados da HEART serem mais adequados para a quantificação do tipo de erro EG_1a, e diminuindo a chance das demais fontes de dados.

6.4 COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO

No projeto de sistemas complexos, a consideração do fator humano é fundamental para a obtenção de soluções que apresentem risco e desempenho aceitáveis. A consideração do desempenho humano ainda na fase de concepção tem o potencial de melhorar o controle do risco e dos custos relacionados a um sistema – e que serão observados ao longo de sua vida útil. Para explorar este potencial, o desenvolvimento de modelos prospectivos que sejam atualizáveis se apresenta como um meio para aperfeiçoar o uso da informação disponível na concepção e da informação que surge no decorrer do projeto, ou mesmo após esta fase da vida do sistema. E é neste contexto que se apresentou a TECHR, que faz o aproveitamento das HEP de ações humanas (quantificadas em bases de dados – e.g., THERP) para estimar as variabilidades de tipos de erro e, por meio destas estimativas, obter as HEP a priori de ações ainda não quantificadas empiricamente.

A aplicação da TECHR permitiu o desenvolvimento de um modelo prospectivo atualizável para o desempenho humano – na forma de uma RB. O emprego da taxonomia de Reason para classificar os tipos de erro humano, em conjunto com a taxonomia de Bloom para classificar as ações humanas, permitiu o desenvolvimento de um modelo abrangente, estruturado e flexível, e que pode ser utilizado na fase de concepção de sistemas. Assim, o modelo obtido pela aplicação da TECHR pode ser explorado para a definição da HEP de forma específica – ao considerar os tipos de erro que podem ocorrer na ação em análise, como alternativa à associação dos dados de desempenho das ações “mais semelhantes” – i.e., à prática de, na ausência de um modelo que contemple a ação em análise, utilizar os dados da ação modelada (pela técnica que está sendo empregada) que mais se assemelhe à ação em análise (MARTINS; MATURANA, 2010). Além disto, os dados fornecidos pelo modelo são distribuídos, i.e., representam as incertezas epistemológicas e inerentes

ao desempenho humano.

Outro efeito esperado da aplicação do modelo de desempenho apresentado neste capítulo é trazer a questão das atividades de treinamento para a fase de concepção do sistema. Isto porque a taxonomia de Bloom, utilizada no modelo para a classificação das ações humanas, foi elaborada para caracterizar os objetivos das experiências educacionais focando a capacitação esperada observável após a submissão do indivíduo a um processo de treinamento (BLOOM et al., 1956). Assim, os objetivos educacionais podem ser associados às ações ainda na fase de concepção, fazendo uma correlação com os dados de confiabilidade humana, que são uma medida de sucesso no aprendizado.

Dentre as dificuldades encontradas para a obtenção do modelo prospectivo a partir da aplicação da TECHR – tanto neste capítulo quanto no anterior – ressaltam-se:

- **A escassez de dados "crus" de desempenho humano:** a totalidade da informação empregada no desenvolvimento do modelo de desempenho foi extraída de técnicas de ACH, já processada por seus autores. O uso desta informação dificultou a associação dos tipos de erro às ações desta base de dados (vide o Capítulo 5);
- **O detalhamento apresentado na literatura para os domínios psicomotor e afetivo da taxonomia de Bloom:** também relacionado à associação dos tipos de erro à ação, este detalhamento foi considerado insuficiente para permitir a associação dos tipos de erro, de forma que foram associados todos os tipos de erro às ações em um dado nível de desempenho, e;
- **Método aproximado para quantificar as HEP:** a impossibilidade de gerar um processo exato e rápido de cálculo e atualização – necessário para o uso na fase de concepção – levou ao emprego de um método aproximado, sendo explorado o MMC (ROBERT; CASELLA, 2004).

7 CONCEPÇÃO DA OPERAÇÃO DO SRPEC

O SRPEC (Sistema de Resfriamento da Piscina de Estocagem de Combustível) está sendo concebido para resfriar os compartimentos de uma PEC (Piscina de estocagem de Combustível) que estoca os EC (Elemento Combustível) recém-removidos de um reator nuclear do tipo PWR, e que ainda produzem calor e mantêm a capacidade de contaminar a água que os resfria – i.e., apresentam calor de decaimento significativo (causado pelos produtos de fissão). Na falta de refrigeração, este calor pode danificar o revestimento dos EC e expor o seu conteúdo radioativo, contaminando o ambiente de forma severa.

Este capítulo traz a concepção de um procedimento operacional para o SRPEC, pela aplicação da metodologia discutida no Capítulo 3 (MARTINS; FRUTUOSO E MELO; MATURANA, 2015), apoiada pelo modelo prospectivo de desempenho humano apresentado no Capítulo 6, definindo a configuração dos fatores humanos sem alterar os equipamentos pré-estabelecidos para este sistema. A próxima seção apresenta esta aplicação e a seguinte discute as conclusões e *insights* obtidos neste processo.

7.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Esta seção apresenta a concepção da operação do SRPEC – com foco na configuração dos fatores humanos e sem alterar os equipamentos do sistema –, conforme descrito nas subseções seguintes, organizadas segundo as etapas propostas nesta metodologia (vide a Fig. 20).

7.1.1 Etapa 1 – Cenário

As informações obtidas na *Etapa 1 – Cenário* foram organizadas nas quatro subseções sintetizadas a seguir, tratando, respectivamente, dos seguintes assuntos: 7.1.1.1) *Descrição da parte já consolidada do sistema* – que faz interface com os operadores e não será alterada; 7.1.1.2) *Restrições para o projeto* – limites a serem observados; 7.1.1.3) *Dados de confiabilidade disponíveis*, e; 7.1.1.4) *Meta de confiabilidade*.

7.1.1.1 Descrição do sistema

O esquema presente na Fig. 45 foi elaborado para facilitar a descrição do SRPEC – os equipamentos envolvidos na operação podem ser identificados pelos seguintes códigos: EC) elemento combustível; T) trocador de calor; B) bomba; P) painel de controle; S) sinal sonoro e/ou luminoso, e; V) válvula. Neste esquema, as linhas contínuas representam as tubulações consideradas neste trabalho e as linhas pontilhadas representam os cabos de controle, de instrumentação e de potência que ligam os componentes do SRPEC – as linhas tracejadas representam a tubulação dos sistemas não modelados neste trabalho (isto porque consideram-se outros critérios e restrições para o procedimento operacional destes sistemas; vide o item 7.1.1.2). Além disso, os sensores que ativam os sinais de monitoramento e controle são representados por círculos posicionados sobre os equipamentos monitorados.

Fig. 45 – Esquema para o SRPEC

Ressalte-se que a Fig. 45 identifica um dos modos operacionais do SRPEC –

modo “D”, conforme discutido mais adiante, quando os EC são posicionados nos compartimentos I e III da PEC, sendo resfriados, respectivamente, pelos trocadores de calor T1 e T3 (hachurados na Fig. 45), e, também respectivamente, com circulação pelas bombas B1 e B3 (hachuradas na Fig. 45). Ilustrando este modo, as válvulas fechadas podem ser identificadas pelo preenchimento (e.g., V57, próxima ao compartimento II).

Dentre as características do SRPEC consideradas importantes para a concepção da operação destacam-se:

- **Funções do sistema:** em operação normal e degradada, refrigerar os compartimentos onde os EC com calor residual significativo estiverem localizados, mantendo a temperatura da água abaixo de 41°C; durante a transição – que pode ocorrer entre a operação normal e a degradada –, manter a temperatura da água na PEC abaixo de 60°C. Espera-se que a PEC receba uma descarga anual de EC;
- **Compartimentos a serem refrigerados:** o EC pode estar presente em quatro compartimentos da PEC, denominados PEC-I (Compartimento I), PEC-II (Compartimento II), PEC-III (Compartimento III) e CT (Canal de Transferência) – estes compartimentos estão identificados na Fig. 45. Destes compartimentos, apenas o CT não será resfriado diretamente – o EC permanecerá pouco tempo neste compartimento. É importante ressaltar que o CT faz a conexão física entre os compartimentos da PEC e que, durante a operação de resfriamento, estes compartimentos são isolados. Assim, na Fig. 45, os compartimentos foram representados isoladamente;
- **Distribuição espacial:** com exceção do painel de controle P2 (e respectivos cabos de controle e instrumentação) e dos sinais S1, S2 e S3, instalados na SC (Sala de Controle), todos os componentes encontram-se no mesmo local – denominado PC (Prédio do Combustível);
- **Monitoração:** para auxiliar a operação, o sistema prevê a monitoração diretamente nos mostradores dos sensores instalados nas proximidades dos equipamentos monitorados – apesar de apresentar alguns destes sensores (conforme discutido mais adiante), a Fig. 45 não apresenta nenhum destes mostradores –, sendo observadas as seguintes variáveis:
a) Temperatura: nos compartimentos da PEC (PEC-I, PEC-II e PEC-III),

- nas bombas (B1, B2, B3 e B4) e nas entradas e saídas dos trocadores de calor (T1, T2 e T3); b) Radiação: na tubulação de saída do lado do casco dos trocadores de calor (T1, T2 e T3); c) Vazão: a jusante das bombas (B1 ou B2, e B3 ou B4) e nos trocadores de calor (T1, T2 e T3), e; d) Pressão: nas bombas (B1, B2, B3 e B4) e nos trocadores de calor (T1, T2 e T3). Ademais, o sistema prevê o envio destes sinais para mostradores (também não representados na Fig. 45) instalados nos painéis P1 e P2;
- **Alarmes:** além da monitoração local, as seguintes variáveis são alarmadas por sinal sonoro e luminoso na SC: a) Temperatura: dos compartimentos da PEC (PEC-I, PEC-II e PEC-III), por meio do sinal S1; b) Vazão: à jusante das bombas (B1 ou B2, e B3 ou B4), por meio do sinal S2, e; c) Radiação: na tubulação de saída do lado do casco dos trocadores de calor (T1, T2 e T3), por meio do sinal S3. Os sensores relacionados a estas variáveis estão representados por círculos na Fig. 45 – apesar desta representação simplificada, estes sensores são apresentados em pares no projeto do SRPEC, podendo ser considerados independentes;
 - **Atuação no sistema:** com exceção do desligamento automático de bomba (B1 e/ou B3) em caso de vazão baixa a jusante e acionamento da bomba em *standby* – B2, em caso de falha de B1 (B1 e B2 são 100% redundantes), e/ou B4, em caso de falha de B3 (B3 e B4 são 100% redundantes) –, todas as ações dos componentes deste sistema dependem de atuação manual. As válvulas são atuadas localmente e as bombas podem ser atuadas tanto localmente no painel P1 quanto remotamente no painel P2. Após o primeiro acionamento, a bomba B1 (e/ou B3) permanecerá em baixa rotação enquanto não houver necessidade de o SRPEC resfriar a PEC (não é desligada), enquanto a bomba B2 (e/ou B4) permanecerá desligada, e será acionada apenas em caso de falha da bomba B1 (e/ou B3) – mediante um sinal de baixa vazão recebido dos sensores, um controlador desativa a bomba B1 (ou B3) e aciona a bomba B2 em *standby* (ou B4);
 - **Tempo de aquecimento e de resfriamento:** considera-se que o SRPEC tem a capacidade de resfriar o maior compartimento da PEC de 41°C a 37°C em 4 horas e que a temperatura da PEC, sem a atuação do SRPEC, se eleva de 37°C a 41°C em 8 horas e de 41°C a 60°C em 38 horas na pior

condição de projeto, i.e., considerando-se a maior temperatura ambiente da série histórica e a maior potência possível para o EC. Além de que, considera-se que em 10 dias o EC apresentará um calor residual insignificante – que não excede a capacidade natural de dissipação de calor na PEC. Assim, considerando que o sistema não opera de forma contínua, o tempo de atuação esperado para o SRPEC foi calculado em 80 horas;

- **Interfaces com outros sistemas:** além do SE (Sistema Elétrico) – não representado na Fig. 45 – que alimenta os equipamentos ligados ao painel P1 e os equipamentos presentes na SC, os seguintes sistemas têm interface com o SRPEC: a) SLP (Sistema de Limpeza e Purificação); b) SARS (Sistema de Água de Resfriamento de Segurança); c) SA (Sistema de Amostragem), e; d) SD (Sistema de Drenagem);
- **Modos operacionais:** os diferentes modos operacionais para este sistema estão apresentados na Tab. 66. Além do modo desligado – modo “O”, na Tab. 66 –, o esquema apresentado na Fig. 45 permite identificar outros 38 modos operacionais. Como mencionado anteriormente, a Fig. 45 ilustra o modo operacional “D” – nesta configuração, a bomba B1 e o trocador de calor T1 resfriam o PEC-I, enquanto a bomba B3 e o trocador de calor T3 resfriam o PEC-III, sendo que o trocador de calor T3 e as bombas B2 e B4 permanecem inativos. Além dos modos para a operação normal, a Tab. 66 apresenta os modos equivalentes (resfriam os mesmos compartimentos) para a operação degradada – os modos degradados podem ser identificados pela mesma letra, mas acompanhada por um número (e.g., sendo “B” o modo em operação normal, os modos “B.1”, “B.2” e “B.3” são os possíveis modos degradados para resfriar o compartimento PEC-II);
- **Procedimento de manutenção:** está prevista a verificação das condições dos equipamentos do SRPEC imediatamente antes de sua entrada em operação. Neste trabalho, no entanto, o procedimento de manutenção não será desenvolvido, sendo considerado que os equipamentos apresentam-se na condição *as good as new* imediatamente após o procedimento de manutenção – será considerada, entretanto, a possibilidade de falha na demanda para os equipamentos que apresentam partes móveis (válvulas, painéis e bombas); não será considerada a probabilidade de falha na

demanda, por exemplo, para os trocadores de calor.

7.1.1.2 Restrições para o projeto

Além das mencionadas características do sistema, apresentam-se as seguintes restrições para o projeto da operação:

- **Confiabilidade:** a probabilidade de não haver o resfriamento do EC com calor residual significativo deve ser menor que $1,00E-07$ em um ano – esta condição é assumida quando a temperatura da água da PEC ultrapassa 60°C . A frequência de falha do SRPEC deve ser menor que $1,00E-03$ em um ano – i.e., o número esperado de falhas em um ano deve ser menor que $1,00E-03$;
- **Mistura do fluido:** com o objetivo de minimizar a geração de rejeitos, os fluidos dos diferentes compartimentos devem ser resfriados de modo independente – e.g., não será permitido que um mesmo trocador de calor ou trecho de circuito participe no resfriamento de dois compartimentos simultaneamente.

Em relação à mistura de fluido, verifica-se que os modos operacionais apresentados na Tab. 66 podem ser alcançados pelo alinhamento adequado das válvulas apresentadas no esquema da Fig. 45. O alinhamento dos equipamentos para cada modo operacional foi reproduzido no Apêndice E.

O critério de confiabilidade apresentado no primeiro tópico sintetiza a preocupação com a falta de resfriamento do EC devido à falha de diferentes sistemas – e.g., além do SRPEC, sistema elétrico de alimentação, sistema de reposição do inventário da piscina. De acordo com este critério, especificamente para o SRPEC, a frequência de falta de resfriamento deve ser menor que $1,00E-03$ em um ano. Ressalte-se que a falta de resfriamento da água pelo SRPEC não resulta, necessariamente, em falta de resfriamento do EC – a falta de resfriamento pelo SRPEC é um evento iniciador para outras ações, incluindo a recuperação do próprio SRPEC por manutenção corretiva e o seu emprego em um modo operacional que não respeite o critério de não mistura de fluido. Estas condições não estão sendo trabalhadas neste texto.

Tab. 66 – Modos operacionais do SRPEC

Modo Operacional	Compartimentos Resfriados	Descrição
O	-	Desligado. Equipamentos inativos. Alinhamento para resfriar os compartimentos I & II.
A	PEC-I	Operação Normal. Circulação pela bomba B1. Resfriamento pelo trocador T1.
A.1		Operação degradada. Circulação pela bomba B1. Resfriamento pelo trocador T2.
A.2		Operação degradada. Circulação pela bomba B1. Resfriamento pelo trocador T3.
A.3		Operação degradada. Circulação pela bomba B2. Resfriamento pelo trocador T1.
A.4		Operação degradada. Circulação pela bomba B2. Resfriamento pelo trocador T2.
A.5		Operação degradada. Circulação pela bomba B2. Resfriamento pelo trocador T3.
B	PEC-II	Operação Normal. Circulação pela bomba B3. Resfriamento pelo trocador T2.
B.1		Operação degradada. Circulação pela bomba B3. Resfriamento pelo trocador T3.
B.2		Operação degradada. Circulação pela bomba B4. Resfriamento pelo trocador T2.
B.3		Operação degradada. Circulação pela bomba B4. Resfriamento pelo trocador T3.
C	PEC-III	Operação Normal. Circulação pela bomba B3. Resfriamento pelo trocador T3.
C.1		Operação degradada. Circulação pela bomba B3. Resfriamento pelo trocador T2.
C.2		Operação degradada. Circulação pela bomba B4. Resfriamento pelo trocador T3.
C.3		Operação degradada. Circulação pela bomba B4. Resfriamento pelo trocador T2.
D	PEC-I & PEC-III	Operação Normal. Circulação pelas bombas B1 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
D.1		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
D.2		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
D.3		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
D.4		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
D.5		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
D.6		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
D.7		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
D.8		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B3. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.
D.9		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B4. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.
D.10		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B3. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.
D.11		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B4. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.
E	PEC-I & PEC-II	Operação Normal. Circulação pelas bombas B1 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
E.1		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
E.2		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
E.3		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T3.
E.4		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
E.5		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
E.6		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B3. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
E.7		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B4. Resfriamento pelos trocadores T1 e T2.
E.8		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B3. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.
E.9		Operação degradada. Circulação pelas bombas B1 e B4. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.
E.10		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B3. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.
E.11		Operação degradada. Circulação pelas bombas B2 e B4. Resfriamento pelos trocadores T2 e T3.

7.1.1.3 Dados de confiabilidade

Os equipamentos que compõem o SRPEC estão definidos e apresentam as probabilidades de falha resumidas na Tab. 67. Os grupos de equipamentos podem ser identificados e correlacionados aos códigos utilizados na Fig. 45, de acordo com a primeira coluna da Tab. 67. Nota-se que esta tabela não traz os dados para cada equipamento, mas as características de falha para os tipos de equipamento.

A terceira coluna da Tab. 67 apresenta as funções dos equipamentos, e a quarta coluna apresenta os modos de falha considerados mais impactantes para o cumprimento da função de cada tipo de componente. A quinta coluna apresenta a probabilidade de falha em 80 horas de operação – este é o tempo de atuação esperado para o SRPEC – quando se adota uma distribuição exponencial para o

tempo de falha dos equipamentos. As taxas de falha e as probabilidades de falha na demanda foram obtidas das referências apresentadas na sétima coluna.

Neste ponto, é importante ressaltar que o SE não é considerado como parte do SRPEC. Para os demais sistemas de interface, foram considerados apenas os componentes representados no esquema da Fig. 45 (e.g., válvula V53 do SD). Assim, não foram tabelados os dados de falha para os demais componentes destes sistemas.

Tab. 67 – Funções dos equipamentos e dados de falha para o SRPEC

Grupos de Equipamentos		Funções	Modos de Falha	P(Falha em 80 horas)	P(Falha na demanda)	Referência
V	Válvula de acionamento manual	Controlar a passagem de água (permitindo ou restringindo) quando atuada.	• Falha em fechar/abrir; • Vazamento; • Obstrução.	1,13E-06	1,41E-05	AICHE
B	Conjunto: motor, transmissão e bomba	Converter a energia elétrica em hidráulica, promovendo a circulação da água.	• Falha na partida; • Falha após a partida.	2,75E-04	6,25E-03	AICHE, DNV
T	Trocador de calor tubo-casco	Resfriar a água.	• Obstrução; • Vazamento.	1,38E-06	-	DNV
	Controlador	Comparar o sinal de entrada com padrão e prover o sinal de saída para a atuação do sistema (e.g., emissão de sinal sonoro, desligamento de bomba).	• Nenhuma saída; • Nenhuma alteração na saída quando alterada a entrada.	1,94E-04	-	DNV
			• Espúrio.	6,40E-06	-	AICHE
	Sinal auditivo: buzina e circuito	Emitir sinal sonoro quando estimulado eletricamente.	• Nenhuma saída; • Saída com baixa intensidade.	2,18E-06	-	DNV
	Sinal luminoso: lâmpada e circuito	Emitir sinal luminoso quando estimulado eletricamente.	• Nenhuma saída; • Saída com baixa intensidade.	3,49E-05	-	DNV
	S	Sensor e mostrador de temperatura [△]	Detectar e processar a medida de temperatura.	• Saída anormal (baixa); • Nenhuma alteração na saída quando alterada a entrada.	4,59E-04	-
• Espúrio.				4,64E-05	-	AICHE
Sensor e mostrador de radiação ⁺		Detectar e processar a medida de radiação.	• Saída anormal (baixa); • Nenhuma alteração na saída quando alterada a entrada.	3,45E-04	-	DNV
			• Espúrio.	4,64E-05	-	AICHE
Sensor e mostrador de vazão [★]		Detectar e processar a medida de vazão.	• Saída anormal (alta); • Nenhuma alteração na saída quando alterada a entrada.	1,02E-04	-	AICHE
			• Espúrio.	4,64E-05	-	AICHE
P	Botões, cabos e circuitos	Permitir/impedir a alimentação elétrica quando atuado.	• Funcionamento espúrio • Falha em abrir/fechar	1,30E-05	2,03E-04	DNV
Outros	Tubulação [★]	Conduzir água entre os componentes do circuito hidráulico.	• Ruptura; • Obstrução.	4,37E-09	-	DNV
	Conexões [★]	Conduzir água entre os componentes do circuito hidráulico.	• Ruptura; • Obstrução.	1,58E-04	-	DNV

[△] : Foram considerados os modos de falha que impedem a identificação da temperatura alta, i.e., o mostrador apresenta temperatura mais baixa que a real.

⁺ : Foram considerados os modos de falha que impedem a identificação da alta radiação, i.e., o mostrador apresenta radiação mais baixa que a real.

[★] : Foram considerados os modos de falha que impedem a identificação da baixa vazão, i.e., o mostrador apresenta vazão mais alta que a real.

[★] : Probabilidade calculada considerando a falha em 1 de 10 trechos de 20 metros – os dados de falha são apresentados para tubulação metálica, em mile-hours.

[★] : Probabilidade calculada considerando a falha em 1 de 10 conexões.

• : AICHE: American institute of Chemical Engineers (1989); e DNV: Det Norske Veritas (2009).

7.1.1.4 Meta de confiabilidade

O critério de confiabilidade para a concepção do SRPEC está associado ao cumprimento da função de resfriamento. Espera-se que a frequência de falta de resfriamento da água da PEC devido à falha do SRPEC seja menor que 1,00E-03/ano (vide item 7.1.1.2). Para calcular esta frequência, foi elaborada a árvore de eventos reproduzida na Fig. 46 – válida para qualquer modo operacional listado na Tab. 66. Com as informações disponíveis para este trabalho, não é possível conhecer os modos operacionais que serão mais (ou menos) demandados no decorrer da vida do sistema. Desta forma, os eventos da árvore apresentada na Fig. 46 serão analisados considerando o pior caso.

Fig. 46 – Árvore de eventos para o SRPEC

Na árvore de eventos da Fig. 46, o evento EI refere-se à necessidade de utilizar o SRPEC e está associado à necessidade de descarga de EC na PEC. Assim, a frequência $\lambda(EI)$ da necessidade de resfriamento da PEC foi estimada considerando-se que a PEC recebe uma descarga anual de EC. Nesta situação, a frequência $\lambda(EI)$ foi igualada a 1/ano. Conforme ordenados nesta árvore de eventos, à necessidade de utilização da PEC seguem-se os seguintes eventos:

- **Eventos #E1 e #E3:** foram inseridos na árvore para que seja considerada

a possibilidade de haver uma falha ainda não descoberta nos componentes do SRPEC (válvulas e painéis de controle) que serão atuados (no alinhamento ou no realinhamento, respectivamente; veja os eventos #A1 e #A2), impedindo que o alinhamento adequado do sistema seja alcançado. Para o evento #E1 não foi considerada a hipótese de falha irre recuperável – i.e., não foi considerada a hipótese de realinhar o sistema em um modo operacional degradado –, já que no momento deste evento o EC ainda não depende do SRPEC para ser resfriado – o EC não será depositado na PEC se o sistema se encontrar em condição degradada;

- **Evento #D1:** refere-se à ação humana de detecção das falhas consideradas no evento #E1. De outra forma, não foi incluído na árvore um evento de detecção das falhas consideradas no evento #E3. Neste caso, o EC com calor residual significativo já dependerá do SRPEC para o seu resfriamento, aumentando a importância do tempo de manutenção do equipamento falho – ressalte-se que o tempo para a manutenção não está sendo considerado neste trabalho;
- **Eventos #A1 e #A2:** as ações humanas executadas no alinhamento e no realinhamento (para um modo operacional degradado) do sistema são consideradas, respectivamente, nestes eventos – as falhas dos equipamentos atuados serão consideradas nos eventos #E1 e #E3;
- **Eventos #M1 e #M2:** referem-se às ações humanas de monitoração da temperatura e acionamento do sistema (o EC será depositado na PEC após este acionamento, que é parte de #M1), sendo que #M2 refere-se ao monitoramento e acionamento do sistema em um modo operacional degradado;
- **Eventos #E2 e #E4:** foram inseridos na árvore de eventos para que a possibilidade de falha de equipamento durante a operação seja considerada. Para o evento #E2, estão sendo modelados dois tipos de falha: a) Recuperáveis (REC na Fig. 46): que podem ser contornadas pelo realinhamento do sistema; b) Irrecuperáveis (IRR na Fig. 46): que não podem ser contornadas sem, por exemplo, ações de manutenção – estas ações alternativas não serão modeladas neste trabalho. De outra forma, como o evento #E4 ocorre depois do evento de realinhamento do sistema (evento #A2), i.e., a falha ocorre quando o sistema opera em um modo

operacional degradado, não foi considerada a hipótese de recuperação neste evento – na Tab. 66, pode ser observado que alguns modos operacionais degradados não podem ser recuperados sem um procedimento de manutenção (e.g., modo “C.2”, em caso de falha da bomba B4), e a manutenção de equipamentos não está sendo considerada neste trabalho;

- **Evento #D2:** refere-se à ação humana de detecção das falhas consideradas no evento #E2. Para o evento #E4 não foi considerada a hipótese de recuperação.

Assim, considera-se, em caso de falha, a possibilidade de apenas um realinhamento – caso isto não fosse assumido, a frequência de falta de resfriamento obtida da árvore de eventos da Fig. 46 poderia ser menor, e a árvore deveria ser alterada para se adequar a esta hipótese –, sendo que o modo operacional degradado a ser obtido por este realinhamento dependerá dos componentes que falharam (detectados no evento #D2). Além disto, considera-se que o EC é introduzido na PEC depois do alinhamento inicial (evento #A1).

A frequência $\lambda(\neg SRPEC)$ de falha do SRPEC, considerando a árvore de eventos na Fig. 46, pode ser calculada conforme a Eq. (121).

$$\lambda(\neg SRPEC) = \lambda(EI) \{ 1 - P(\#A1)P(\#M1)[P(\#E1) + P(\neg \#E1) * P(\#D1)][P(\#E2) + P(\neg \#E2_REC)P(\#D2)P(\#E3) * P(\#A2)P(\#M2)P(\#E4)] \} \quad (121)$$

Os eventos #A1, #A2, #M1, #M2, #D1 e #D2 terão as suas probabilidades definidas na *Etapa 8 – Confiabilidade do Sistema* desta aplicação, quando a confiabilidade das possíveis soluções será comparada ao critério de confiabilidade apresentado na Eq. (122).

$$\lambda(\neg SRPEC) \leq 1,00E - 3/\text{ano} \quad (122)$$

Visto que não se pretende alterar a parte já concebida do sistema, as probabilidades para os eventos #E1, #E2, #E3 e #E4 podem ser estimadas com base nas informações disponíveis sobre o SRPEC. Como não há informação a priori sobre a frequência de uso de cada modo operacional do SRPEC, estas probabilidades foram estimadas de forma conservadora.

Para o cálculo das probabilidades de falha $P(\neg \#E1)$ no evento $\#E1$, foi considerada a necessidade de reconfigurar o sistema partindo do modo operacional “O” para um dos seguintes modos operacionais: “A”, “B”, “C”, “D” ou “E” – vide a Tab. 66. O Apêndice E apresenta o alinhamento dos equipamentos em cada modo operacional e permite identificar os equipamentos que devem ser atuados para que ocorra esta mudança de modo operacional. Para a ocorrência do evento $\neg \#E1$ é considerada a falha na demanda de um ou mais dos painéis e válvulas atuados, considerando as probabilidades apresentadas na Tab. 67 na coluna “P(Falha na demanda)” – as falhas na demanda das bombas (incluindo as redundantes) serão consideradas no evento $\#E2$. Os resultados deste cálculo podem ser conferidos na Tab. 68.

Os resultados apresentados na última linha da Tab. 68 referem-se à probabilidade de haver uma ou mais falhas de equipamento que impeçam o alinhamento e consequente obtenção do modo operacional desejado, partindo do modo “O”. A alteração para o modo “B” (dados hachurados na Tab. 68) apresenta a maior probabilidade de falha (igual a $6,74E-04$), representando o pior caso para a probabilidade do evento $\neg \#E1$. Assim, esta será a probabilidade adotada para a solução da Eq. (121) – isto porque, com as informações disponíveis para este trabalho, não é possível conhecer a frequência relativa de demanda (no decorrer da vida do sistema) entre os modos operacionais.

De forma semelhante à análise do evento $\#E1$, para o cálculo das probabilidades de falha $P(\neg \#E3)$ no evento $\#E3$, foi considerada a necessidade de reconfigurar o sistema partindo de um dos modos operacionais “A”, “B”, “C”, “D” ou “E” para um modo operacional degradado equivalente, i.e., que resfrie o mesmo conjunto de compartimentos – vide a Tab. 66. Este cálculo foi executado para cada alteração possível, conforme exemplificado na Tab. 69 para o caso de resfriamento do PEC-III – envolvendo os modos operacionais “C”, “C.1”, “C.2” e “C.3”.

Os resultados apresentados na última linha da Tab. 69 referem-se à probabilidade de haver uma ou mais falhas de equipamento que impeçam o alinhamento e consequente obtenção do modo operacional degradado desejado. Os resultados obtidos desta forma para todos os modos operacionais estão apresentados na Tab. 70.

Tab. 68 – Obtenção da probabilidade de falha no evento #E1

Equipamentos que podem falhar no evento #E1 (partindo de "O")											
Modo	O		A		B		C		D		E
Componente	Estado	Estado	P(falha)	Estado	P(falha)	Estado	P(falha)	Estado	P(falha)	Estado	P(falha)
T1	SB	ON	0,00E+00	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00
T2	SB	SB	0,00E+00	ON	0,00E+00	SB	0,00E+00	SB	0,00E+00	SB	0,00E+00
T3	SB	OF	0,00E+00	SB	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00
B1	SB	ON	0,00E+00	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00
B2	SB	SB	0,00E+00	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00	SB	0,00E+00	SB	0,00E+00
B3	SB	OF	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00
B4	SB	OF	0,00E+00	SB	0,00E+00	SB	0,00E+00	SB	0,00E+00	SB	0,00E+00
V10	CL'	CL	1,41E-05	OP	1,41E-05	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V11	OP	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V14	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V17	OP	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V22	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V23	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V25	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V27	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V28	OP	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V31	CL	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00
V34	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00
V35	CL	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V36	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00
V37	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00
V38	OP	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V4	OP	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V40	CL	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V44	OP	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V45	CL	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V46	OP	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V47	OP	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00
V5	OP	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V51	OP	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00
V52	CL	CL	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V53	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	CL'	0,00E+00
V56	OP	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V57	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00
V62	CL	CL'	0,00E+00	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V63	OP	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V64	CL	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V65	CL'	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	CL'	0,00E+00
V7	OP	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V70	OP	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V71	CL	OP	1,41E-05	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V72	CL	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00
V73	OP	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V74	OP	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V75	CL	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V76	OP	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V9	OP	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
P1	CL	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04
P2	CL	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04	OP	2,03E-04
P(¬#E1)			4,48E-04		6,74E-04		5,89E-04		5,33E-04		4,06E-04

Possíveis estados dos equipamentos: OP) Opened; CL) Closed; SB) Standby; ON) On; OF) Off, e; OS) Out of service ou falha com resultado semelhante). O apóstrofo indica que tal estado é indiferente para o referido modo operacional. O valor nulo indica que não houve alteração de estado, ou que a alteração de estado não tem impacto na probabilidade do evento #E1 (de acordo com o que foi considerado para este evento).

Na Tab. 70 estão hachuradas as maiores probabilidades de falha em cada tipo de alteração. Partindo do modo "A", as maiores probabilidades de fracasso referem-se às alterações para os modos "A.2" e "A.5", com $P(\neg\#E3)$ iguais a 2,82E-04, sendo as maiores probabilidades dentre as alterações consideradas na Tab. 70. Assim, na falta de informações sobre a demanda relativa dos modos operacionais,

esta será a probabilidade adotada neste trabalho para a solução da Eq. (121).

Tab. 69 – Obtenção da probabilidade de falha no evento #E3, partindo do modo “C”

<i>Equipamentos que podem falhar no evento #E3 (partindo de "C")</i>							
<i>Modo</i>	<i>C</i>		<i>C.1</i>		<i>C.2</i>		<i>C.3</i>
<i>Componente</i>	<i>Estado</i>	<i>Estado</i>	<i>P(falha)</i>	<i>Estado</i>	<i>P(falha)</i>	<i>Estado</i>	<i>P(falha)</i>
T1	OF	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00
T2	SB	ON	0,00E+00	SB	0,00E+00	ON	0,00E+00
T3	ON	OS	0,00E+00	ON	0,00E+00	OS	0,00E+00
B1	OF	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00
B2	OF	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00	OF	0,00E+00
B3	ON	ON	0,00E+00	OS	0,00E+00	OS	0,00E+00
B4	SB	SB	0,00E+00	ON	0,00E+00	ON	0,00E+00
V10	CL'	OP	1,41E-05	CL'	0,00E+00	OP	1,41E-05
V11	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V14	CL'	CL	1,41E-05	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05
V17	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V22	OP	OP	0,00E+00	OP'	0,00E+00	OP'	0,00E+00
V23	OP	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V25	OP	OP	0,00E+00	OP'	0,00E+00	OP'	0,00E+00
V27	OP	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V28	OP	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05
V31	OP	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05
V34	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V35	CL	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05
V36	CL	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V37	OP	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V38	OP	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05
V4	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V40	CL	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05
V44	OP	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05
V45	CL	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05
V46	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V47	CL	CL'	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V5	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V51	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V52	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V53	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V56	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V57	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V62	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V63	OP	CL'	0,00E+00	OP	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V64	CL'	CL	1,41E-05	CL'	0,00E+00	CL	1,41E-05
V65	CL	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05
V7	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
V70	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V71	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V72	OP	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
V73	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V74	CL	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00	CL	0,00E+00
V75	CL	OP	1,41E-05	CL	0,00E+00	OP	1,41E-05
V76	OP	CL	1,41E-05	OP	0,00E+00	CL	1,41E-05
V9	CL'	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00	CL'	0,00E+00
P1	OP	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
P2	OP	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00	OP	0,00E+00
<i>P(¬#E3)</i>			1,83E-04	0,00E+00		1,83E-04	

Neste ponto é importante ressaltar que o modo operacional escolhido para definir $P(\neg\#E3)$ é incompatível com o modo operacional escolhido para definir $P(\neg\#E1)$ – e.g., não se espera que o SRPEC parta do modo “B” para o modo degradado “A.2”. Esta solução conservadora foi adotada porque nesta altura do projeto não estão disponíveis informações suficientes para definir quais modos operacionais serão predominantes – e que justificariam a análise do impacto das

combinações de modos de partida (“A”, “B”, “C”, “D” ou “E”) e respectivos modos degradados no resultado da Eq. (121).

Tab. 70 – Probabilidade de falha no evento #E3 (do modo normal para o degradado)

Partindo de:	Modo	$P(\neg\#E3)$	Partindo de:	Modo	$P(\neg\#E3)$	Partindo de:	Modo	$P(\neg\#E3)$
A	A.1	1,83E-04	D	D.1	0,00E+00	E	E.1	0,00E+00
	A.2	2,82E-04		D.2	0,00E+00		E.2	0,00E+00
	A.3	0,00E+00		D.3	0,00E+00		E.3	0,00E+00
	A.4	1,83E-04		D.4	1,69E-04		E.4	1,55E-04
	A.5	2,82E-04		D.5	1,69E-04		E.5	1,55E-04
B	B.1	1,55E-04		D.6	1,69E-04		E.6	1,55E-04
	B.2	0,00E+00		D.7	1,69E-04		E.7	1,55E-04
	B.3	1,55E-04		D.8	1,55E-04		E.8	1,69E-04
C	C.1	1,83E-04		D.9	1,55E-04		E.9	1,69E-04
	C.2	0,00E+00		D.10	1,55E-04		E.10	1,69E-04
	C.3	1,83E-04		D.11	1,55E-04		E.11	1,69E-04

Para a estimativa da probabilidade $P(\neg\#E2)$ de falha no evento #E2, foi elaborada a RB apresentada na Fig. 47. A probabilidade $P(\neg\#E2)$ é igualada a 6,62E-04, resultado da soma das probabilidades dos estados “FALHA” – $P(\neg\#E2_REC)$ igual a 4,00E-04 – e “FALHA_IRR” – $P(\neg\#E2_IRR)$ igual a 2,62E-04 – do nó “#E2” discriminado em vermelho. As TPC para os nós da RB na Fig. 47 – e as probabilidades para os nós raízes – foram reproduzidas no Apêndice F.

Como pode ser observado na Fig. 47, a RB para o evento #E2 foi desenvolvida para considerar um modo operacional em que haja o resfriamento de dois compartimentos da PEC (a rede representa o comportamento do SRPEC tanto no modo “D” quanto no modo “E” no evento #E2) – ressalte-se que nesta RB basta a falta de resfriamento em um dos compartimentos para que seja considerada a falha do SRPEC. Os nós “Trocador de Calor 1”, “Bomba B1A”, “Bomba B1B (*standby*)”, “Sensor e Mostrador B1A” e “Sensor e Mostrador B1B” representam componentes que estão resfriando um compartimento, e os nós “Trocador de Calor 2”, “Bomba B2A”, “Bomba B2B (*standby*)”, “Sensor e Mostrador B2A” e “Sensor e Mostrador B2B” representam componentes que estão resfriando outro compartimento. Nesta RB, os eventos, os estados e os grupos de componentes do SRPEC estão representados da seguinte forma:

- Os nós discriminados em amarelo referem-se aos componentes do sistema que podem falhar devido ao vazamento e/ou à obstrução durante a operação, impedindo o adequado encaminhamento do fluido – ressalte-se que as falhas que impedem o alinhamento/realinhamento do sistema foram consideradas nos eventos #E1 e #E3. Os nós discriminados por asterisco

representam componentes que, em caso de falha individual, levam o sistema a uma condição em que a sua função não pode ser recuperada pelo realinhamento – e.g., obstrução na válvula V72 quando é necessário resfriar o PEC-III: vide Fig. 45. Os nós homônimos, não discriminados por asterisco, representam componentes equivalentes que, em caso de falha individual, podem ser contornados ou isolados pelo realinhamento do sistema;

Fig. 47 – Rede bayesiana para o evento #E2

- Os nós discriminados em roxo representam os sistemas que fazem interface com o SRPEC e que influenciam sua capacidade de resfriamento. A importância do SE (nó “Sistema Elétrico”) e do SARS (nó “Sistema de Água de Resfriamento de Segurança”) está, respectivamente, no fornecimento de energia para o bombeamento e na remoção de calor dos trocadores de calor; o SLP (nó “Sistema de Limpeza e Purificação”) é importante porque pode ser utilizado para a reposição de perdas de água devidas a vazamento. Para estes três sistemas, foi desconsiderada a possibilidade de falha (visto no item 7.1.1.2 que a meta de confiabilidade considerada nesta aplicação refere-se ao SRPEC). Os demais sistemas – SA e SD – que fazem interface com o SRPEC não foram modelados;
- As bombas são representadas pelos nós discriminados em verde – as bombas B1A e B1B devem resfriar o trocador de calor 1, e as bombas B2A e B2B devem resfriar o trocador de calor 2. Para considerar a falha destes equipamentos, foram incluídos no modelo os estados “Falha na demanda” e “Falha em 80 horas” para as bombas que operam (B1A e B2A) e o estado “Falha na demanda” para as bombas em *standby* (B1B e B2B). As falhas concomitantes das bombas B1A e B1B, ou das bombas B2A e B2B levam a uma falha irrecuperável do SRPEC;
- Os nós que apresentam os estados dos componentes dedicados à monitoração e controle estão discriminados em azul. Como pode ser observado na rede, tanto o P1 (nó “Painel 1”) quanto o P2 (nó “Painel 2”) controlam todas as bombas do sistema, mas os sinais devido à falta de vazão (gerados por um controlador) são enviados especificamente para cada grupo de bombas – i.e., o nó “Sinal 2-1” refere-se às bombas B1A e B1B e o nó “Sinal 2-2” refere-se às bombas B2A e B2B. Assim, os sensores e mostradores também são específicos para os grupos de bombas, mas o sistema apresenta apenas um controlador – i.e., este controlador recebe os sinais dos sensores e, em caso de vazão baixa em um grupo de bombas (e.g., B1A e B1B), aciona a bomba em *standby* (e.g., B1B) e desliga a bomba acionada inicialmente (e.g., B1A) por meio de um sinal de controle (e.g., “Sinal 2-1”);
- Os nós brancos representam eventos que levam ou podem levar à falta de resfriamento na PEC – e.g., o nó “Bombeamento 1” refere-se ao sucesso

ou à falta de bombeamento (recuperável ou não) no circuito que inclui o trocador de calor 1; o nó “Encaminhamento do Fluido” refere-se ao sucesso ou à falha (obstrução, vazamento ou falha irrecoverável) em qualquer parte do sistema que impeça o resfriamento de pelo menos um compartimento.

A RB apresentada na Fig. 47 pode ser adaptada para considerar os modos operacionais em que ocorre o resfriamento de apenas um compartimento da PEC. Isto pode ser feito pela inserção da evidência de sucesso no nó “Trocador de Calor 2”, pela exclusão dos nós relativos aos componentes e eventos relacionados ao trocador de calor 2 e pela adequação da TPC do nó “#E2” para esta nova condição. A rede obtida desta forma – apresentada no Apêndice F, na Fig. 68, juntamente com a TPC do nó “#E2” alterado – permitiu obter a probabilidade $P(\neg \#E2)$ para o caso de um compartimento a ser resfriado. Neste caso, $P(\neg \#E2)$ é igualada a 5,27E-04, resultado da soma das probabilidades dos estados “FALHA” – $P(\neg \#E2_REC)$ igual a 3,04E-04 – e “FALHA_IRR” – $P(\neg \#E2_IRR)$ igual a 2,23E-04 – do nó “#E2”. Assim, para a solução da Eq. (121), será adotado o resultado obtido considerando a necessidade de resfriar dois compartimentos da PEC.

Como pode ser observado na árvore de eventos da Fig. 46, no evento #E4 não se considera a possibilidade de recuperação de falha. Para a estimativa da probabilidade $P(\neg \#E4)$ de falha no evento #E4, no entanto, a rede apresentada na Fig. 47 pode ser alterada para considerar a pior condição degradada – em relação à probabilidade de falha – em que o SRPEC ainda opera. Para tanto, a necessidade de resfriar dois trocadores de calor foi mantida, mas foram retiradas as bombas em *standby* – para as bombas mantidas, foi desconsiderada a hipótese de falha na demanda, já considerada no evento #E2 – para isto, anulou-se a probabilidade do estado dos nós relativos à falha na demanda. Além disto, foram mantidas as possibilidades de desligamento das bombas devido aos sinais espúrios dos componentes de monitoração e controle. As TPC para os nós “Bombeamento 1” e “Bombeamento 2” foram adequadas a estas alterações – o Apêndice F apresenta a RB (na Fig. 69) e as TPC alteradas. A rede obtida desta forma permitiu igualar a estimativa da probabilidade $P(\neg \#E4)$ de falha no evento #E4 a 1,13E-03.

A Tab. 71 apresenta em resumo as probabilidades dos eventos relacionados às falhas dos equipamentos do SRPEC empregadas ao longo deste trabalho.

Tab. 71 – Eventos relacionados às falhas dos equipamentos

<i>Evento</i>	<i>Descrição</i>	<i>P(Falha Recuperável)</i>	<i>P(Falha Irrecuperável)</i>
#E1	<i>Sucesso de equipamentos no alinhamento do SRPEC</i>	6,74E-04	-
#E2	<i>Sucesso de equipamentos durante o resfriamento (em condição normal)</i>	4,00E-04	2,62E-04
#E3	<i>Sucesso de equipamentos no realinhamento do SRPEC</i>	-	2,82E-04
#E4	<i>Sucesso de equipamentos durante o resfriamento (em condição degradada do SRPEC)</i>	-	1,13E-03

Considerando os dados apresentados na Tab. 71 e a hipótese de não haver chance para o erro humano durante a operação – probabilidade nula de erro humano –, a estimativa obtida na árvore de eventos da Fig. 46 para a frequência de falha do SRPEC é 2,63E-04/ano. Considera-se, portanto, que esta é a menor frequência possível para a falha do SRPEC se for mantido o que foi assumido neste item e nos itens anteriores desta subseção, e se for possível encontrar uma solução para a operação do SRPEC que agregue pouco à frequência de falha do sistema.

7.1.2 Etapas cíclicas – 1º iteração

As etapas cíclicas da metodologia são realizadas iterativamente – vide a Fig. 20. Nesta aplicação foram realizadas duas iterações. Esta subseção apresenta os resultados da primeira iteração e a subseção 7.1.3 apresenta os resultados da segunda iteração neste grupo de etapas.

7.1.2.1 Etapa 2 – Análise de tarefas

Para a determinação da sequência inicial das tarefas que compõem o procedimento operacional do SRPEC, foi aplicada a técnica HTA (KIRWAN; AINSWORTH, 1992; SHEPHERD, 1989), conforme descrita por Stanton (2006) – o primeiro parágrafo do item 3.2.2.1 apresenta uma justificativa para a escolha da HTA; na Fig. 21, apresentam-se as correlações entre os passos da HTA e as etapas da metodologia de concepção. Assim, considerando o contexto descrito na Etapa 1, foram definidos os objetivos primários do procedimento operacional, diretamente relacionados aos eventos ordenados na árvore de eventos da Fig. 46, da seguinte forma:

- **Objetivos da tarefa de detecção relacionada ao evento #D1:** detectar possíveis válvulas emperradas, problemas nos painéis e indisponibilidade das bombas (e.g., garantir que uma bomba não esteja em manutenção) – sendo que as falhas das bombas, dado que estavam disponíveis no início da operação, serão detectadas no evento #D2. Observa-se que este trabalho não considera o erro no procedimento de manutenção – sendo que a possibilidade indicada neste parágrafo foi mantida para facilitar a sua consideração em trabalho futuro;
- **Objetivos da tarefa de detecção de falha recuperável relacionada ao evento #D2:** detectar as possíveis falhas no SRPEC e avaliar as possibilidades de recuperação;
- **Objetivo da tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A1:** alinhar as válvulas e demais componentes do SRPEC consistentemente com o modo operacional adequado às necessidades de resfriamento (e.g., compartimento a ser resfriado);
- **Objetivos da tarefa de realinhamento relacionada ao evento #A2:** seleccionar o modo operacional degradado adequado às necessidades de resfriamento, e alinhar as válvulas e os componentes do SRPEC consistentemente com este modo operacional;
- **Objetivos da tarefa de monitoração e acionamento relacionada ao evento #M1:** acionar o SRPEC, monitorar a temperatura na PEC e, se necessário, atuar no SRPEC (e.g., alterar o estado das bombas de “ligado” para “desligado”); e
- **Objetivos da tarefa de monitoração e acionamento relacionada ao evento #M2:** acionar o SRPEC, monitorar a temperatura na PEC e atuar no SRPEC.

A aplicação da HTA (STANTON, 2006) levou à discretização dos objetivos primários das tarefas dos operadores no SRPEC e à possibilidade de associar atividades humanas para que estes objetivos sejam alcançados. Para a tarefa de detecção relacionada ao evento #D1, a discretização dos objetivos e as atividades humanas associadas estão apresentadas na Tab. 72. Os códigos associados às possíveis atividades humanas serão tratados mais adiante, quando será explicada a obtenção da Fig. 48.

Tab. 72 – Objetivos da tarefa de detecção no evento #D1 e atividades humanas

<i>Primários</i>	<i>Secundários</i>	<i>Terciários</i>	<i>Possíveis Atividades Humanas</i>
1 Detectar válvula emperrada	1.1 Durante a identificação da válvula, detectar as falhas reveladas por seus aspectos gerais	N/D	2. Verificar a presença de válvula emperrada (na identificação)
	1.2 Durante o acionamento da válvula, detectar as falhas reveladas por seu comportamento anormal	1.2.1 Sensibilizar-se com o fim precoce/excessivo do curso	4. Verificar a presença de válvula emperrada (no acionamento)
		1.2.2 Sensibilizar-se com as folgas, os sinais de vazamento, a corrosão, os sons estranhos, a necessidade de esforço excessivo/reduzido	
	1.3 Após o acionamento da válvula, detectar a resposta diferente da esperada	N/D	11. Acompanhar o comportamento do sistema após o acionamento
2 Detectar problema no painel	2.1 Durante a identificação do botão e seu acionamento, detectar as falhas reveladas por seus aspectos gerais	N/D	9. Verificar as condições gerais dos botões de acionamento
	2.2 Após o acionamento do botão, detectar uma resposta diferente da esperada	N/D	11. Acompanhar o comportamento do sistema após o acionamento
3 Detectar a indisponibilidade das bombas	N/D	N/D	6. Realizar o teste das bombas
N/D: Detalhamento de objetivo não desenvolvido até o nível indicado			

Para a tarefa de detecção relacionada ao evento #D2, a discretização dos objetivos e as atividades humanas associadas estão apresentadas na Tab. 73. Ressalte-se que, para a tarefa nesta tabela, está sendo considerada a hipótese de detecção de falhas recuperáveis. Assim, os objetivos foram divididos entre a detecção de uma falha qualquer (vide o item 1 na Tab. 73) e a avaliação das possibilidades de recuperação (vide o item 2 na Tab. 73).

Para a tarefa de alinhamento do SRPEC relacionada ao evento #A1, a discretização do objetivo e as atividades humanas associadas estão apresentadas na Tab. 74. Nesta tabela, o objetivo 1.4. *Alinhar os sistemas de controle* refere-se à alimentação e ao modo de atuação do controlador e sensores, de forma que monitorem e atuem apenas nas bombas e linhas de interesse para o modo operacional do SRPEC. E, ainda na Tab. 74, o objetivo 1.3. *Alinhar os trocadores de calor* refere-se ao acionamento do SARS, permitindo o funcionamento de determinado trocador de calor – não se refere, portanto, ao alinhamento das válvulas adjacentes aos trocadores de calor (indicadas na Fig. 45). Ressalte-se que, na construção da Tab. 73, levou-se em consideração que o erro no alinhamento dos componentes de controle não leva à falha irreversível do sistema – i.e., no evento #D2, pode ocorrer uma correção (vide o item 2.1.3.3 da Tab. 73). Entretanto, estes erros serão considerados na quantificação das probabilidades de erro e de sucesso no evento #A1, sendo que, nesta etapa, não foram alocadas possíveis ações de recuperação às atividades de alinhamento do sistema.

Tab. 73 – Objetivos da tarefa de detecção de falha recuperável no evento #D2

Primários	Secundários	Terciários	Quaternários	Possíveis Atividades Humanas
1	Detectar a falta de bombeamento	1.1.1 Detectar o sinal luminoso de baixa vazão	N/D	
		1.1.2 Detectar o sinal sonoro de baixa vazão	N/D	13. Monitorar a vazão no SRPEC
		1.1.3 Detectar baixa vazão nos mostradores locais	N/D	
		1.1.4.1 Detectar o sinal luminoso de alta temperatura		
		1.1.4 Detectar por meio da elevação de temperatura na PEC	1.1.4.2 Detectar o sinal sonoro de alta temperatura	12. Monitorar a temperatura da PEC
	Detectar o problema de encaminhamento do fluido	1.1.4.3 Detectar alta temperatura nos mostradores locais		
		1.2.1 Detectar o vazamento em inspeção local	N/D	14. Verificar o estado dos componentes do SRPEC
		1.2.2 Detectar o vazamento por meio do sinal luminoso de radiação	N/D	
		1.2.3 Detectar o vazamento por meio do sinal sonoro de radiação	N/D	15. Monitorar a radiação no SRPEC
		1.2.4 Detectar o vazamento por meio dos mostradores locais (radiação)	N/D	
		1.2.5 Detectar a obstrução por meio do sinal luminoso de baixa vazão	N/D	
		1.2.6 Detectar a obstrução por meio do sinal sonoro de baixa vazão	N/D	13. Monitorar a vazão no SRPEC
		1.2.7 Detectar a obstrução por meio dos mostradores de vazão locais	N/D	
		1.2.8.1 Detectar o sinal luminoso de alta temperatura		
		1.2.8 Detectar por meio da elevação de temperatura na PEC	1.2.8.2 Detectar o sinal sonoro de alta temperatura	12. Monitorar a temperatura da PEC
			1.2.8.3 Detectar alta temperatura nos mostradores locais	
	1.3 Detectar a falta de energia elétrica			Não modelado
	1.4 Detectar a falta de resfriamento na água do SARS			Não modelado
2	Avaliar a possibilidade de recuperação	2.1.1 Detectar o sinal espúrio de baixa vazão	2.1.1.1 Detectar sinal espúrio de sensor	19d. Verificar o funcionamento das bombas
			2.1.1.2 Detectar sinal espúrio de controlador	20d. Avaliar a possibilidade de sinal espúrio/falho de baixa vazão
		2.1.2 Detectar o sinal espúrio dos painéis de controle	N/D	19d. Verificar o funcionamento das bombas
				21d. Avaliar a possibilidade de sinal espúrio de painel
	Avaliar a possibilidade de recuperação após um problema no encaminhamento do fluido	2.1.3 Detectar a falha no sinal de baixa vazão	2.1.3.1 Detectar a falha de sensor	19d. Verificar o funcionamento das bombas
			2.1.3.2 Detectar a falha de controlador	20d. Avaliar a possibilidade de sinal espúrio/falho de baixa vazão
			2.1.3.3 Detectar o erro humano no alinhamento do sistema*	
		2.2.1 Detectar as obstruções (válvulas, tubos, conexões e trocadores de calor)	N/D	19d. Verificar o funcionamento das bombas
	2.2 Avaliar a possibilidade de recuperação após um problema no encaminhamento do fluido	2.2.2 Detectar os vazamentos (válvulas, tubos, conexões e trocadores de calor)	N/D	23d. Realizar o teste de fluxo nos trechos de tubulação
				22d. Inspeccionar linhas

N/D: Detalhamento de objetivos não desenvolvido até o nível indicado;

(*)*: A falha em atingir este objetivo será considerada na quantificação das probabilidades de falha e de sucesso no evento #A1 (vide a Tab. 74).

A tarefa relacionada ao evento #A2 apresenta o mesmo objetivo da tarefa relacionada ao evento #A1 acrescido da necessidade de considerar a condição degradada do SRPEC. Ademais, no realinhamento, não é necessário alinhar o

sistema de controle e monitoração. Para a tarefa relacionada ao evento #A2, a discretização dos objetivos e as atividades humanas associadas estão apresentadas na Tab. 75.

Tab. 74 – Objetivos da tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A1

<i>Primários</i>		<i>Secundários</i>	<i>Possíveis Atividades Humanas</i>
1	Alinhar as válvulas e os componentes do SRPEC consistentemente com o modo operacional adequado à necessidade de resfriamento	1.1	Alinhar as válvulas
		1.2	Alinhar as bombas
		1.3	Alinhar trocadores de calor
		1.4	Alinhar os sistemas de controle
			3. <i>Alinhar</i> as válvulas de acordo com o modo operacional
			5. <i>Alinhar</i> as bombas de acordo com o modo operacional
			7. <i>Alinhar</i> os trocadores de calor de acordo com o modo operacional
			8. <i>Alinhar</i> os sistemas de controle de acordo com o modo operacional

Tab. 75 – Objetivos da tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A2

<i>Primários</i>		<i>Secundários</i>	<i>Possíveis Atividades Humanas</i>
1	Selecionar o modo operacional adequado à necessidade de resfriamento	1.1	Listar as indisponibilidades no sistema
		1.2	Definir o modo operacional
2	Alinhar as válvulas e os componentes do SRPEC consistentemente com o modo operacional selecionado	2.1	Alinhar as válvulas
		2.2	Alinhar as bombas
		2.3	Alinhar os trocadores de calor
			24d. <i>Listar</i> as indisponibilidades do sistema
			25d. <i>Definir</i> um novo modo operacional
			26d. <i>Alinhar</i> as válvulas de acordo com o modo operacional
			27d. <i>Alinhar</i> as bombas de acordo com o modo operacional
			28d. <i>Alinhar</i> os trocadores de calor de acordo com o modo operacional

Para a tarefa de acionamento – o EC será depositado na PEC após este acionamento – e monitoração do SRPEC relacionada ao evento #M1, a discretização dos objetivos e as atividades humanas associadas estão apresentadas na Tab. 76. Nesta tabela, o objetivo 2.4. *Colocar o sistema em standby* refere-se à interrupção do resfriamento após 10 dias, quando o EC apresentará calor residual insignificante – o sistema será mantido preparado para atuar em caso de necessidade (este período não será modelado neste trabalho; esta atividade foi mantida no modelo, entretanto, para a sua consideração em trabalho futuro). Neste ponto, é importante ressaltar que, em princípio, não foi considerada uma atividade específica de recuperação em caso de falha humana na monitoração.

Para a tarefa de acionamento e monitoração do SRPEC relacionada ao evento #M2, a discretização dos objetivos e as atividades humanas associadas estão apresentadas na Tab. 77. Apesar da semelhança entre estes objetivos e os apresentados na Tab. 76 referente ao evento #M1, no evento #M2, o operador estará tratando do acionamento e monitoração do sistema degradado.

Tomando como base os objetivos apresentadas nas tabelas deste item, foi possível organizar uma sequência lógica de execução das atividades pelos operadores, e que atende ao cenário proposto na Etapa 1 (vide a subseção 7.1.1),

i.e., que resulte no comportamento do sistema de acordo com os requisitos pré-estabelecidos. A Fig. 48 apresenta uma sequência com estas características para as atividades humanas na operação do SRPEC. Esta é a sequência que será utilizada nas próximas etapas da concepção do procedimento operacional deste sistema.

Tab. 76 – Objetivos da monitoração e acionamento relacionados ao evento #M1

Primários		Secundários	Terciários	Possíveis Atividades Humanas
1	Acionar o SRPEC	1.1 Acionar o SRPEC via P1/P2	N/D	10. Acionar o SRPEC via P1/P2
		1.2 Acionar o SRPEC localmente (em caso de falha nos painéis)	N/D	
2	Monitorar a temperatura na PEC e atuar no SRPEC (após o acionamento inicial)	2.1 Monitorar a temperatura	2.1.1 Monitorar a temperatura no painel 2.1.2 Monitorar a temperatura no mostrador local	12. Monitorar a temperatura da PEC
		2.2 Decidir atuar no sistema	N/D	16. Decidir atuar no sistema
		2.3 Acionar o sistema	N/D	17. Atuar no SRPEC via P1/P2
		2.4 Colocar o sistema em <i>standby</i>	2.4.1 Acionar o SRPEC via P1/P2 2.4.2 Acionar o SRPEC localmente (em caso de falha nos painéis)	18. Colocar o sistema em <i>standby</i>

N/D: Detalhamento de objetivos não desenvolvido até o nível indicado.

Tab. 77 – Objetivos da monitoração e acionamento relacionados ao evento #M2

Primários		Secundários	Terciários	Possíveis Atividades Humanas
1	Acionar o SRPEC	1.1 Acionar o SRPEC via P1/P2	N/D	29d. Atuar no SRPEC
		1.2 Acionar o SRPEC localmente (em caso de falha nos painéis)	N/D	
2	Monitorar a temperatura na PEC e atuar no SRPEC (após o acionamento inicial)	2.1 Monitorar a temperatura	2.1.1 Monitorar a temperatura no painel 2.1.2 Monitorar a temperatura no mostrador local	30d. Monitorar a temperatura da PEC
		2.2 Decidir atuar no sistema	N/D	31d. Decidir atuar no sistema
		2.3 Acionar o sistema	2.3.1 Acionar o SRPEC via P1/P2 2.3.2 Acionar o SRPEC localmente (em caso de falha nos painéis)	29d. Atuar no SRPEC
		2.4 Colocar o sistema em <i>standby</i>	2.4.1 Acionar o SRPEC via P1/P2 2.4.2 Acionar o SRPEC localmente (em caso de falha nos painéis)	32d. Colocar o sistema em <i>standby</i>

N/D: Detalhamento de objetivos não desenvolvido até o nível indicado.

Na Fig. 48, o início e o fim da operação foram representados pelos círculos hachurados. Nesta figura, as setas indicam a próxima ação a ser executada, sendo que as setas tracejadas indicam a próxima atividade em caso de detecção de anomalia. Além disto, as atividades foram numeradas de acordo com a ordem de execução. As atividades a serem executadas quando o sistema encontrar-se em um estado degradado têm a numeração acompanhada pela letra “d”. Nas últimas colunas das tabelas deste item (da Tab. 72 à Tab. 77), as atividades desta sequência foram associadas aos objetivos das tarefas por meio desta numeração.

Na sequência de atividades representada na Fig. 48, é possível identificar três fases no procedimento operacional. A primeira, anterior à inserção do EC na PEC, é

caracterizada pela possibilidade de consertar o sistema, solucionando possíveis anomalias – sendo considerado que o procedimento de manutenção, realizado anteriormente à entrada em operação, seja bem-sucedido (vide o item 7.1.1.1). A segunda, posterior à inserção do EC na PEC, é marcada por um ciclo de ações de monitoração (tanto da temperatura na PEC quanto do estado do SRPEC) e atuação. A terceira fase refere-se à possível operação do sistema em um modo degradado, como consequência da identificação de uma anomalia na segunda fase operacional. Assim, as atividades de 19d a 28d referem-se a um período operacional transiente em que pode não estar ocorrendo o resfriamento da água pelo SRPEC. Ressalte-se que o dano ao EC pode acontecer nas duas últimas fases – tanto devido às falhas recuperáveis quando devido às não recuperáveis.

Especificamente para a atividade 1, é importante ressaltar que a execução depende de fatores que não estão sendo considerados nesta aplicação – a necessidade de resfriamento depende dos estados dos EC a serem resfriados, e a avaliação do estado do EC está fora do escopo desta aplicação. Assim, apesar de mantida na análise, esta atividade não foi considerada na quantificação da confiabilidade do SRPEC.

Fig. 48 – Sequência inicial de atividades no procedimento operacional do SRPEC

Na Fig. 48, é possível identificar três grupos cíclicos de atividades. O primeiro envolve as atividades de 1 a 11 e inclui a atividade não modelada “Solucionar a anomalia”. Neste ciclo de atividades, quando encontrada uma anomalia (e.g., válvula emperrada na atividade 2), ocorre a resolução da anomalia e o reinício do ciclo. O segundo ciclo envolve as atividades de 12 a 17, e refere-se às atividades de monitoração da temperatura (atividade 12, quando a temperatura estiver entre 37° e 41°C), decisão sobre atuar no sistema (atividade 16, quando a temperatura estiver próxima de 37° ou de 41°C) e atuação no sistema (atividade 17), intercalada por atividades que visam ao encontro de anomalias (atividades 13, 14 e 15) – que podem dar início à operação em um modo degradado. O terceiro ciclo envolve as atividades 29d, 30d e 31d, e é parecido com o segundo, exceto por assumir a ausência de atividades que visam ao encontro de anomalias.

7.1.2.2 Etapa 3 – Tecnologia disponível

Esta etapa é dedicada à formação de um banco de dados para os equipamentos aplicáveis ao sistema em desenvolvimento. Neste trabalho, no entanto, não se deseja a concepção do SRPEC completo – englobando os equipamentos e a operação –, mas a concepção do procedimento operacional, sem considerar a alteração dos equipamentos considerados na Etapa 1 (vide o item 7.1.1.3). Assim, os equipamentos considerados nas próximas etapas são aqueles listados na Tab. 67.

7.1.2.3 Etapa 4 – Funções dos equipamentos

Os dados funcionais e de confiabilidade para os equipamentos considerados na Etapa 3 são aqueles apresentados na Etapa 1 (vide o item 7.1.1.3). Assim, as funções dos equipamentos são aquelas listadas na Tab. 67.

7.1.2.4 Etapa 5 – Funções humanas

No modelo prospectivo de desempenho humano obtido pela aplicação da

TECHR, as ações humanas genéricas foram categorizadas segundo a taxonomia de Bloom (BLOOM et al., 1956) e o modelo SRK (REASON, 1990), e as HEP destas ações foram determinadas a partir da combinação das funções de probabilidades dos tipos de erro obtidas de diferentes fontes de dados – conforme descrito nos Capítulos 5 e 6. Como apresentadas, as informações neste modelo podem ser integradas ao processo de concepção de sistemas complexos proposto no Capítulo 3. Assim, os dados de desempenho humano considerados na concepção do procedimento operacional do SRPEC podem ser obtidos diretamente deste modelo. Para uma ação qualquer, isto pode ser feito de acordo com o seguinte procedimento: 1) classificar a ação segundo a taxonomia de Bloom; 2) pela semelhança de suas classificações – segundo a taxonomia de Bloom –, correlacionar a ação a uma ação genérica do modelo prospectivo de desempenho humano apresentado no Capítulo 6; 3) definir o nível de desempenho para a ação segundo o modelo SRK; e 4) tomar a distribuição da HEP apresentada na Tab. 64 para a ação genérica e para o nível de desempenho que foram correlacionados à ação.

7.1.2.5 Desenvolvimento de soluções – ciclo 1

As Etapas 6, 7 e 8 são consideradas em ciclos de desenvolvimento de soluções – etapas discriminadas em vermelho na Fig. 20. Nesta iteração, foram realizados dois ciclos de desenvolvimento (itens 7.1.2.5 e 7.1.2.6).

7.1.2.5.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 1)

Neste primeiro agrupamento dos agentes, assumiu-se que o tempo para a realização das tarefas no SRPEC não é uma variável crítica – isto porque, na pior condição, no transiente entre a operação em um modo normal e a operação em um modo degradado, a água da PEC atingirá a temperatura limite somente se o transiente durar mais que 38 horas (tempo necessário para a elevação da temperatura de 41°C a 60°C, vide o item 7.1.1.1). Assim, em princípio, foi

considerado apenas um executor para a operação do SRPEC, que realizará as atividades uma a uma, i.e., não foram consideradas execuções em paralelo. Assim, a Tab. 78 apresenta a correlação entre as atividades na sequência da Fig. 48 a serem executadas por este agente e as ações do modelo prospectivo de desempenho humano desenvolvido nos Capítulos 5 e 6. Em princípio, estas são as atividades que serão consideradas no desenvolvimento do procedimento operacional do SRPEC.

Tab. 78 – Correlação com as ações do modelo prospectivo de desempenho humano

<i>Atividades</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo**</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
1. Associar a necessidade de resfriamento a um modo operacional	Cognitivo	Lembrar	Recordar	A_C_2a	Regra
2. Verificar a presença de válvula emperrada (na identificação)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
3. Alinhar as válvulas de acordo com o modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
4. Verificar a presença de válvula emperrada (no acionamento)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
5. Alinhar as bombas de acordo com o modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
6. Realizar o teste das bombas	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
7. Alinhar os trocadores de calor de acordo com o modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
8. Alinhar os sistemas de controle de acordo com o modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
9. Verificar as condições gerais dos botões de acionamento	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A_C_5b	Conhecimento
10. Acionar o SRPEC via P1/P2	Psicomotor	Movimento Básico	-	A_P_2	Habilidade
11. Acompanhar o comportamento do sistema após o acionamento	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
12. Monitorar a temperatura da PEC	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
13. Monitorar a vazão no SRPEC	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
14. Verificar o estado dos componentes do SRPEC	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
15. Monitorar a radiação no SRPEC	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
16. Decidir atuar no sistema	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A_C_5b	Conhecimento
17. Atuar o SRPEC via P1/P2	Psicomotor	Movimento Básico	-	A_P_2	Habilidade
18. Colocar o sistema em standby*	Psicomotor	Movimento Básico	-	A_P_2	Habilidade
19d. Verificar o funcionamento das bombas	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
20d. Avaliar a possibilidade de sinal espúrio/falho de baixa vazão	Cognitivo	Analisar	Diferenciar	A_C_4a	Conhecimento
21d. Avaliar a possibilidade de espúrio de painel	Cognitivo	Analisar	Diferenciar	A_C_4a	Conhecimento
22d. Inspeccionar linhas	Cognitivo	Analisar	Diferenciar	A_C_4a	Conhecimento
23d. Realizar o teste de fluxo nos trechos de tubulação	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
24d. Listar as indisponibilidades do sistema	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
25d. Definir um novo modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Implementar	A_C_3b	Regra
26d. Alinhar as válvulas de acordo com o modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
27d. Alinhar as bombas de acordo com o modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
28d. Alinhar os trocadores de calor de acordo com o modo operacional	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
29d. Atuar no SRPEC	Psicomotor	Movimento Básico	-	A_P_2	Habilidade
30d. Monitorar a temperatura da PEC	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
31d. Decidir atuar no sistema	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A_C_5b	Conhecimento
32d. Colocar o sistema em standby*	Psicomotor	Movimento Básico	-	A_P_2	Habilidade

(*)*As ações nesta atividade não foram consideradas nas próximas etapas – considera-se que o erro nesta atividade não impactará o resfriamento do EC (será executada após o período de 10 dias de operação quando o EC não mais produzirá calor residual significativo);

(**) Apenas para o domínio cognitivo.

De acordo com a taxonomia de Bloom, os domínios de desempenho, as categorias e os processos cognitivos – especificamente para o domínio cognitivo – foram correlacionados às atividades listadas na primeira coluna da Tab. 78. Isto foi feito considerando as características das atividades listadas na Etapa 2 (vide tabelas no item 7.1.2.1). Desta forma, foi possível associar os níveis de desempenho e as ações do modelo prospectivo de desempenho humano às ações a serem executadas pelo operador do SRPEC, conforme apresentados nas últimas colunas da Tab. 78. Os dados de confiabilidade para as ações humanas consideradas na Tab. 78 são apresentados na Tab. 79.

Tab. 79 – HEP para as ações apresentadas na Tab. 78

<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
A C 2a	Regra
A C 3a	Habilidade
A C 3b	Regra
A C 4a	Conhecimento
A C 5a	Regra
A C 5b	Conhecimento
A P 2	Habilidade

7.1.2.5.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 1)

Neste trabalho não está sendo considerada a alteração dos equipamentos que compõem o SRPEC. Assim, a escolha a ser feita pode estar relacionada ao número de operadores e ao tipo de tarefa a ser realizada por eles. Estas escolhas foram feitas na etapa anterior (vide item 7.1.2.5.1), sendo associada uma ação a cada atividade – não se realizou, portanto, uma escolha entre alternativas pré-concebidas. Na próxima etapa, no entanto, apresentam-se algumas considerações sobre os efeitos do contexto nas HEP das ações do procedimento operacional.

7.1.2.5.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 1)

Neste tópico foi analisada a adequação das associações apresentadas nas etapas anteriores frente à meta de confiabilidade estabelecida no item 7.1.1.4. Com as atividades da sequência definida na Etapa 2 (vide o item 7.1.2.1) associadas às

ações do modelo prospectivo de desempenho humano (vide a Tab. 78), foi possível desenvolver a RB apresentada na Fig. 49 para verificar se este critério de projeto é atingido e, por meio de inferência bayesiana, apontar alternativas para a melhoria da proposta de concepção.

Fig. 49 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (ciclo 1)

A RB da Fig. 49 foi obtida pela conversão da árvore de eventos da Fig. 46 em RB (nós verdes na Fig. 49), pela alimentação dos nós referentes ao desempenho

dos equipamentos com os dados apresentados na Tab. 71, pelo acréscimo de nós pais para os eventos relacionados ao desempenho humano referentes às atividades apresentadas na sequência de atividades da Fig. 48 – nós azuis na Fig. 49, identificados pela numeração da atividade precedida pela letra S (em referência à sequência de atividades) –, e pela agregação das ações do modelo de desempenho apresentadas na Tab. 78 (representadas pelos nós amarelos na Fig. 49). A topologia desta rede e o preenchimento das TPC foram realizados observando as seguintes relações (as TPC foram apresentadas no Apêndice G):

- A falha no alinhamento inicial (evento $\neg\#A1$) ocorrerá se houver inadequação na execução de uma das possíveis atividades listadas na Tab. 74;
- A falha no realinhamento do sistema (evento $\neg\#A2$) ocorrerá se houver inadequação na execução de uma das possíveis atividades listadas na Tab. 75;
- Ocorrerá a falha na monitoração (evento $\neg\#M1$) se houver inadequação na execução de alguma das atividades de acionamento e monitoração listadas na Tab. 76, com exceção da atividade 18 – considera-se que o erro nesta atividade não impactará o resfriamento do EC porque será executada após o período de 10 dias de operação (quando o EC não mais produzirá calor residual significativo). É interessante ressaltar que, neste primeiro ciclo, não foram consideradas ações para a recuperação do erro humano na monitoração, sendo que as atividades de detecção (relacionadas ao evento $\#D2$) referem-se à falha dos equipamentos – a necessidade de considerar ações redundantes será avaliada no final desta etapa (i.e., o modelo probabilístico para este ciclo não considera esta possibilidade);
- Ocorrerá a falha na monitoração em condição degradada (evento $\neg\#M2$) se houver inadequação na execução de alguma das atividades de acionamento e monitoração listadas na Tab. 77, com exceção da atividade 32d – da mesma forma que a atividade 18, considera-se que o erro nesta atividade não impactará o resfriamento do EC. É interessante ressaltar que, neste primeiro ciclo, não foram consideradas ações para a recuperação do erro humano na monitoração – no desenvolvimento deste ciclo 1, considerou-se que a avaliação da rede (vide os próximos parágrafos)

- indicaria a necessidade (ou não) de modelar estas ações (de fato, estas ações foram consideradas no ciclo 2; vide o item 7.1.2.6);
- Considera-se, de forma conservadora, que ocorrerá o fracasso na detecção (evento $\neg\#D1$) se houver inadequação na execução das atividades relacionadas na Tab. 72 (respeitadas as combinações apresentadas na Tab. 140 do Apêndice G), independentemente do tipo de equipamento que possa ter falhado;
 - Como pode ser visto na Tab. 73, alguns tipos de falha de equipamentos podem ser detectados por diferentes atividades – e.g., falta de bombeamento pode ser detectada tanto pela atividade 12 quanto pela atividade 13. Assim, considera-se que ocorrerá o fracasso na detecção (evento $\neg\#D2$) se ocorrer inadequação na execução de uma ou mais das seguintes combinações de atividades: a) 12 e 13: obstrução não é detectada; b) 12 e 14: vazamento para o meio não é detectado; c) 15; vazamento no trocador de calor não é detectado; d) 19d: mau funcionamento das bombas não é considerado; e) 20d: mau funcionamento do controlador não é considerado; f) 21d: mau funcionamento do painel não é considerado; g) 22d: vazamento na tubulação não é considerado, ou; h) 23d: obstrução na tubulação não é considerada. Ressalte-se que a RB considera de forma conservadora que haverá a detecção inadequada se houver qualquer destas combinações, independentemente do tipo de equipamento que possa ter falhado. Além de que, foi desconsiderada na RB a contribuição da falha dos sensores para o fracasso nas atividades 12, 13 e 15 – as HEP para as ações associadas a estas atividades (vide a Tab. 78 e a Tab. 79) são significativamente maiores (três ordens de grandeza) que as probabilidades de falha destes equipamentos (vide a Tab. 67).

Na RB da Fig. 49, os nós (azuis) referentes às atividades são determinísticos, i.e., o fracasso na execução da ação associada leva à inadequação do resultado da atividade. As HEP associadas aos nós para estas ações foram obtidas da Tab. 79, da coluna “Mediana” – na Etapa 9 (vide a subseção 7.1.4), será calculada a variabilidade da probabilidade de falha do SRPEC considerando as distribuições para as HEP destas ações (vide o Apêndice D).

Por meio da RB da Fig. 49, a probabilidade de falha do SRPEC, dada a

necessidade de uso deste sistema, foi estimada em 51,42%, sendo maior que a probabilidade estabelecida no item 7.1.1.4 – i.e., 0,1% – ajudando a concluir que, como concebido, o procedimento operacional para o SRPEC representado nesta RB é inadequado. Por meio de inferência bayesiana, considerando a evidência de falha no SRPEC, foi possível encontrar os nós desta RB mais impactados – com maior aumento de probabilidade de erro, dada a evidência. A Tab. 80 apresenta os resultados obtidos desta forma.

Tab. 80 – Probabilidade de “Fracasso”/“Inadequado” para os nós da RB da Fig. 49

Nó	Sem evidência de falha do SRPEC	Com evidência de falha do SRPEC	Varição
S3	7,00E-02	1,36E-01	94,49%
S5	7,00E-02	1,36E-01	94,49%
S7	7,00E-02	1,36E-01	94,49%
S8	7,00E-02	1,36E-01	94,49%
M1	3,50E-01	6,81E-01	94,48%
S10	5,00E-02	9,72E-02	94,48%
S17	5,00E-02	9,72E-02	94,48%
Resfriamento da Água na PEC	5,14E-01	1,00E+00	94,48%
S12	1,00E-01	1,94E-01	94,48%
S16	2,00E-01	3,89E-01	94,48%
A1	2,52E-01	4,90E-01	94,48%
D2	3,46E-01	3,58E-01	3,47%
D1	2,63E-02	2,64E-02	0,06%
S11	1,00E-01	1,00E-01	0,02%
M2	3,16E-01	3,16E-01	0,01%
A2	3,19E-01	3,19E-01	0,01%
S20d	4,00E-02	4,00E-02	0,01%
S21d	4,00E-02	4,00E-02	0,01%
S22d	4,00E-02	4,00E-02	0,01%
S25d	9,00E-02	9,00E-02	0,01%
S29d	5,00E-02	5,00E-02	0,01%
S23d	7,00E-02	7,00E-02	0,01%
S24d	7,00E-02	7,00E-02	0,01%
S26d	7,00E-02	7,00E-02	0,01%
S27d	7,00E-02	7,00E-02	0,01%
S28d	7,00E-02	7,00E-02	0,01%
S15	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S19d	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S30d	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S31d	2,00E-01	2,00E-01	0,01%
S9	2,00E-01	2,00E-01	0,00%
S6	7,00E-02	7,00E-02	0,00%
S13	1,00E-01	1,00E-01	0,00%
S14	1,00E-01	1,00E-01	0,00%
S18	5,00E-01	5,00E-01	0,00%
S2	1,00E-01	1,00E-01	0,00%
S32d	5,00E-01	5,00E-01	0,00%
S4	1,00E-01	1,00E-01	0,00%

Obs.: as linhas hachuradas indicam eventos da árvore da Fig. 46

Verificam-se na Tab. 80 que, dada a evidência de falha no SRPEC, os eventos mais impactados, i.e., com maior aumento de probabilidade de falha (sendo que os nós foram ordenados na Tab. 80 de acordo com este critério), são o #M1 e o #A1 – este resultado era esperado, já que a influência dos demais eventos sobre a falha do SRPEC é mais sensível à ocorrência de falha nos equipamentos (vide a Tab. 141 no Apêndice G) –, seguidos pelos eventos #D2 e #D1. Nesta tabela, os

eventos da árvore da Fig. 46 estão hachurados.

As atividades mais impactadas estão relacionadas aos eventos #A1 e #M1 (nós “S3”, “S5”, “S7”, “S8”, “S10”, “S12”, “S16” e “S17”). Para que haja um maior aumento relativo na confiabilidade do sistema, estes resultados sugerem que haja alterações nas ações humanas associadas a estas atividades – nós “A_C_3a”, “A_C_3a_1”, “A_C_3a_2”, “A_C_3a_3”, “A_P_2”, “A_P_2_1”, “A_C_5a_4” e “A_C_5b” na RB da Fig. 49. Empregando os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 79 para estas ações, a probabilidade de falha do SRPEC foi estimada em 15,62%.

Assumindo que o emprego do percentil 5% para a probabilidade de erro em uma ação está associado à evidência de boas condições para a sua execução – e.g., operadores experientes, boas condições organizacionais (MARTINS; MATURANA, 2013) –, conclui-se que somente a melhora nas condições de execução não é suficiente para que a confiabilidade do SRPEC assuma um valor aceitável (vide o item 7.1.1.4). Assim, é necessário alterar a sequência de atividades definidas na Etapa 2 (realizar outra iteração nas etapas cíclicas) ou associar ações ainda não consideradas na Etapa 6 (realizar outro ciclo de desenvolvimento de soluções). Como neste primeiro ciclo foram ignoradas as atividades redundantes (e.g., recuperação do erro humano), optou-se por retornar à Etapa 6, conforme pode ser verificado no item 7.1.2.6.

7.1.2.6 Desenvolvimento de soluções – ciclo 2

7.1.2.6.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 2)

As atividades discriminadas no item 7.1.2.5.3 – vide a Tab. 80 – foram as seguintes: a) Anteriores ao posicionamento do EC na PEC: 3, 5, 7, 8, 10 e 11; b) Posteriores ao posicionamento do EC na PEC: 12, 16 e 17. A estas atividades foram acrescidas ações de verificação e ações redundantes, independentes das incluídas no item 7.1.2.5.1 (vide a Tab. 78), na forma discriminada na Tab. 81 – foram incluídas as ações hachuradas. Esta tabela também apresenta a correlação entre as ações incluídas e as ações do modelo prospectivo de desempenho humano – esta correlação foi feita da forma descrita no item 7.1.2.5.1.

Para a execução das ações incluídas nesta etapa é necessário mais um agente na operação do SRPEC. Assim, neste ciclo, foram identificados os operadores OP1 e OP2 para as ações que podem ocorrer ao mesmo tempo ou que devem ser realizadas por operadores diferentes. Nas atividades 11, 12, 16 e 17, considera-se que os dois operadores têm autonomia para decidir e atuar no sistema (são independentes) – sendo que quando um atua, o outro verifica (atividade 17). Como pode ser observado na Tab. 81, as ações acrescentadas não são de tipos diferentes dos já apresentados na Tab. 79.

Tab. 81 – Correlação com as ações do modelo prospectivo de desempenho humano

<i>Atividade</i>	<i>Ações</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
3. Alinhar as válvulas de acordo com o modo operacional	3.1. Alinhar (OP1)	Cognitivo	Aplicar	Executar	A C 3a	Habilidade
	3.2. Verificar (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
5. Alinhar as bombas de acordo com o modo operacional	5.1. Alinhar (OP1)	Cognitivo	Aplicar	Executar	A C 3a	Habilidade
	5.2. Verificar (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
7. Alinhar os trocadores de calor de acordo com o modo operacional	7.1. Alinhar (OP1)	Cognitivo	Aplicar	Executar	A C 3a	Habilidade
	7.2. Verificar (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
8. Alinhar os sistemas de controle de acordo com o modo operacional	8.1. Alinhar (OP1)	Cognitivo	Aplicar	Executar	A C 3a	Habilidade
	8.2. Verificar (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
10. Acionar o SRPEC via P1/P2	10.1. Acionar (OP1)	Psicomotor	Movimento Básico	-	A P 2	Habilidade
	10.2. Verificar (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
11. Acompanhar o comportamento do sistema após o acionamento	11.1. Acompanhar (OP1)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
	11.2. Acompanhar (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A C 5b	Conhecimento
12. Monitorar a temperatura da PEC	12.1. Monitorar (OP1)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
	12.2. Monitorar (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra
16. Decidir atuar no sistema	16.1. Decidir (OP1)	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A C 5b	Conhecimento
	16.2. Decidir (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A C 5b	Conhecimento
17. Atuar no SRPEC via P1/P2	17.1. Acionar (OP1 ou OP2)	Psicomotor	Movimento Básico	-	A P 2	Habilidade
	17.2. Verificar (OP2 ou OP1)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A C 5a	Regra

7.1.2.6.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 2)

Esta etapa não foi considerada neste ciclo – vide a justificativa no item 7.1.2.5.2.

7.1.2.6.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 2)

A RB apresentada na Fig. 49 foi revista para considerar as alterações apresentadas no item 7.1.2.6.1, sendo obtida a RB apresentada na Fig. 50.

Na rede da Fig. 50, os nós em laranja referem-se às ações acrescentadas no ciclo 2 (item 7.1.2.6.1) – os demais nós já foram apresentados na descrição da RB da Fig. 49. As TPC para os nós desta rede estão apresentadas no Apêndice G – onde são indicadas as alterações em relação à RB da Fig. 49. As HEP associadas aos nós para as ações acrescentadas neste ciclo foram obtidas da Tab. 79, da

coluna “Mediana” – na Etapa 9, para a solução final, serão utilizados todos os dados das distribuições das HEP (vide a subseção 7.1.4).

Fig. 50 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (ciclo 2)

Conforme a RB da Fig. 50, a frequência de falha do SRPEC foi calculada em 8,56%. Por meio de inferência bayesiana, considerando a evidência de falha no SRPEC, foi possível encontrar os nós desta RB mais impactados. A Tab. 82 apresenta os resultados obtidos desta forma.

Verifica-se na Tab. 82 que, dada a evidência de falha no SRPEC, e

considerando as alterações propostas neste ciclo, os eventos #A1 e o #M1 continuam sendo os mais impactados – seguidos pelo evento #D2. Assim, as atividades relacionadas a estes eventos continuam sendo as atividades a serem alteradas para que haja um maior aumento relativo da confiabilidade do sistema – apesar da significativa redução na probabilidade de ocorrência de falha nestes eventos (e.g., a probabilidade de fracasso no evento #A1 passou de 2,52E-01 para 2,77E-02 depois das alterações propostas neste ciclo).

Tab. 82 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Inadequado” para a RB da Fig. 50

<i>Nó</i>	<i>Sem evidência de falha do SRPEC</i>	<i>Com evidência de falha do SRPEC</i>	<i>Variação</i>
A1	2,77E-02	3,24E-01	1067,61%
M1	5,91E-02	6,90E-01	1067,60%
S10	5,00E-03	5,84E-02	1067,60%
S12	1,00E-02	1,17E-01	1067,60%
S16	4,00E-02	4,67E-01	1067,60%
S17	5,00E-03	5,84E-02	1067,60%
S3	7,00E-03	8,17E-02	1067,60%
S5	7,00E-03	8,17E-02	1067,60%
S7	7,00E-03	8,17E-02	1067,60%
S8	7,00E-03	8,17E-02	1067,60%
Resfriamento da Água na PEC	8,56E-02	1,00E+00	1067,60%
D2	3,35E-01	3,49E-01	4,17%
D1	5,27E-03	5,31E-03	0,72%
S11	2,00E-02	2,00E-02	0,18%
A2	3,19E-01	3,20E-01	0,13%
M2	3,16E-01	3,16E-01	0,13%
S23d	7,00E-02	7,01E-02	0,13%
S24d	7,00E-02	7,01E-02	0,13%
S26d	7,00E-02	7,01E-02	0,13%
S27d	7,00E-02	7,01E-02	0,13%
S28d	7,00E-02	7,01E-02	0,13%
S20d	4,00E-02	4,01E-02	0,13%
S21d	4,00E-02	4,01E-02	0,13%
S22d	4,00E-02	4,01E-02	0,13%
S25d	9,00E-02	9,01E-02	0,13%
S29d	5,00E-02	5,01E-02	0,13%
S15	1,00E-01	1,00E-01	0,13%
S19d	1,00E-01	1,00E-01	0,13%
S30d	1,00E-01	1,00E-01	0,13%
S31d	2,00E-01	2,00E-01	0,13%
S9	2,00E-01	2,00E-01	0,01%
S6	7,00E-02	7,00E-02	0,01%
S13	1,00E-01	1,00E-01	0,00%
S14	1,00E-01	1,00E-01	0,00%
S18	5,00E-01	5,00E-01	0,00%
S2	1,00E-01	1,00E-01	0,00%
S32d	5,00E-01	5,00E-01	0,00%
S4	1,00E-01	1,00E-01	0,00%

Obs.: as linhas hachuradas indicam eventos da árvore da Fig. 46

Especificamente para as ações mais impactadas (relativas às atividades 3, 5, 7, 8, 10, 12, 16 e 17), se for considerada a falha do SRPEC (ações relacionadas às

atividades mais impactadas na Tab. 82), empregando os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 79 em vez dos dados da coluna “Mediana”, a probabilidade de falha do SRPEC foi estimada em 0,92%. Assim, considerar as alterações propostas no ciclo 2 – redundância ou verificação para as atividades mais impactantes – e a melhora nas condições de execução (das ações mais impactantes) não foi suficiente para o atendimento da meta estabelecida no item 2.1.4. Fez-se necessária, portanto, a continuidade da busca por uma solução para o sistema. Optou-se pelo retorno à Etapa 2 para a alteração da sequência de atividades propostas inicialmente, realizando outra iteração nas etapas cíclicas da metodologia.

7.1.3 Etapas cíclicas – 2ª iteração

Este tópico apresenta os resultados da 2ª iteração no grupo de etapas cíclicas da metodologia – desenvolvida com base nos resultados da 1ª iteração (subseção anterior).

7.1.3.1 Etapa 2 – Análise de tarefas

Nos resultados da iteração anterior (subseção 7.1.2), verifica-se que os eventos #M1 e #A1 são os que mais impactam a confiabilidade do SRPEC. Para a redução deste impacto, a sequência de atividades apresentada na Fig. 48 pode ser alterada com foco nas atividades relacionadas a estes eventos.

Assim, mantendo inalterados os objetivos das tarefas relacionadas aos demais eventos, os seguintes objetivos podem ser acrescentados às tarefas relacionadas aos eventos #A1 e #M1: 1) Evento #A1: detectar os problemas de alinhamento resultantes de ação humana; 2) Evento #M1: detectar a inadequação no acionamento inicial – i.e., a resposta do sistema que seja diferente da esperada para o modo operacional – e acionar o SRPEC 8 horas depois do último resfriamento (independentemente da monitoração de temperatura). Espera-se que a inclusão destes objetivos diminua o impacto das atividades relacionadas aos demais

objetivos. As Tabs. 74 e 76 foram alteradas para considerar estas mudanças, sendo obtidas as Tabs. 83 e 84, respectivamente – as linhas incluídas foram hachuradas. Na Tab. 84, o objetivo de detectar a inadequação do acionamento inicial (convertido no objetivo 1.3. *Após o acionamento, detectar uma resposta diferente da esperada*) foi incluído como um objetivo secundário relacionado ao objetivo 1, *Acionar o SRPEC*. O objetivo 1, *Acionar o SRPEC*, nesta segunda iteração, refere-se tanto ao acionamento quando à garantia de sua adequação.

Tab. 83 – Objetivos da tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A1 (2º iteração)

<i>Primários</i>	<i>Secundários</i>	<i>Possíveis Atividades Humanas</i>
1 Alinhar as válvulas e os componentes do SRPEC consistentemente com o modo operacional adequado à necessidade de resfriamento	1.1 Alinhar as válvulas	3. <i>Alinhar</i> as válvulas de acordo com o modo operacional
	1.2 Alinhar as bombas	5. <i>Alinhar</i> as bombas de acordo com o modo operacional
	1.3 Alinhar trocadores de calor	7. <i>Alinhar</i> os trocadores de calor de acordo com o modo operacional
	1.4 Alinhar os sistemas de controle	8. <i>Alinhar</i> os sistemas de controle de acordo com o modo operacional
2 Detectar o problema de alinhamento resultante da ação humana (após o alinhamento)	N/D	11. <i>Acompanhar</i> o comportamento do sistema após o acionamento

Tab. 84 – Objetivos da monitoração e acionamento no evento #M1 (2º iteração)

Tab. 64 – Objetivos da monitoração e acionamento no evento #11 (2.ª iteração)						
Primários		Secundários		Terciários	Possíveis Atividades Humanas	
1	Acionar o SRPEC	1.1	Acionar o SRPEC via P1/P2	N/D	10. <i>Acionar</i> o SRPEC via P1/P2	
		1.2	Acionar o SRPEC localmente (em caso de falha nos painéis)	N/D		
		1.3	Após o acionamento, detectar uma resposta diferente da esperada	N/D	11. <i>Acompanhar</i> o comportamento do sistema após o acionamento	
2	Monitorar a temperatura na PEC e atuar no SRPEC (após o acionamento inicial)	2.1	Monitorar a temperatura	2.1.1	Monitorar a temperatura no painel	12. <i>Monitorar</i> a temperatura da PEC
				2.1.2	Monitorar a temperatura no mostrador local	
		2.2	Decidir atuar no sistema	N/D	16. <i>Decidir</i> atuar no sistema	
		2.3	Acionar o sistema	N/D	17. <i>Atuar no</i> SRPEC via P1/P2	
		2.4	Colocar o sistema em <i>standby</i>	2.4.1	Acionar o SRPEC via P1/P2	18. <i>Colocar</i> o sistema em <i>standby</i>
2.4.2	Acionar o SRPEC localmente (em caso de falha nos painéis)					
3	Acompanhar o tempo e acionar o SRPEC 8 horas após o resfriamento	3.1	Acompanhar o tempo	N/D	33. <i>Cronometrar</i> o tempo	
		3.2	Acionar o sistema	N/D	17. <i>Atuar no</i> SRPEC via P1/P2	

Para a tarefa de alinhamento relacionada ao evento #A1 (Tab. 83), considerou-se a possibilidade de recuperação do alinhamento inadequado e, assim, a atividade 11 (anteriormente considerada apenas para a detecção de falhas de equipamentos; vide a Tab. 72) passou a ser considerada para a detecção de desvios causados pelo operador – este acompanhamento representa uma oportunidade para a observação da manifestação dos erros latentes.

Para a tarefa de acionamento e monitoração do SRPEC relacionada ao

evento #M1 (Tab. 84), considerou-se a possibilidade de recuperação do acionamento inadequado e, assim, a atividade 11 passou a ser considerada para a detecção de desvios causados pelo operador durante o acionamento. Além disto, foi incluída a atividade 33. *Cronometrar o tempo*, constituindo-se em uma atividade redundante às atividades de monitoramento e decisão relacionadas ao objetivo 2. *Monitorar a temperatura na PEC e atuar no SRPEC (após o acionamento inicial)*.

É interessante notar que alguns dos objetivos acrescentados não deram origem a novas atividades. Isto porque estes objetivos foram agregados às atividades já consideradas na primeira iteração (subseção 7.1.2) – as características destas atividades (e.g., o tipo de atividade, o envolvimento do operador, o tempo de execução, a posição cronológica na sequência da Fig. 48) permitem a inclusão de ações humanas (realizada na Etapa 6 da metodologia), aumentando o volume de trabalho na atividade, mas sem alterar significativamente suas características.

Tomando como base a sequência apresentada na Fig. 48 e as atividades e objetivos apresentados nas tabelas deste item, foi possível organizar uma sequência lógica de execução das atividades pelos operadores, e que atende ao cenário proposto na Etapa 1 (vide subseção 7.1.1). Esta sequência foi apresentada na Fig. 51.

7.1.3.2 Etapa 3, 4 e 5

Para esta iteração, foram mantidos os comentários apresentados nos itens 7.1.2.2, 7.1.2.3 e 7.1.2.4, respectivamente para as Etapas 3, 4 e 5 da primeira iteração.

7.1.3.3 Desenvolvimento de soluções – ciclo 1

7.1.3.3.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 1)

Dada a semelhança entre as sequências apresentadas na Fig. 48 e na Fig. 51, neste ciclo 1 da segunda iteração, foram repetidas as ações consideradas no

ciclo 2 da primeira iteração (vide o item 7.1.2.6.1), sendo acrescida a ação referente à atividade 33. A Tab. 85 apresenta a correlação entre a ação do agente envolvido nesta atividade e a ação do modelo prospectivo de desempenho humano – esta correlação foi feita da forma descrita no item 7.1.2.5.1. As atividades 11 e 17 foram alteradas na Etapa 2 desta segunda iteração – foram agregados dois objetivos à atividade 11 e um objetivo à atividade 17. Entretanto, este acréscimo de objetivos não alterou de forma significativa as características das ações que devem ser realizadas para que todos os objetivos associados a estas atividades sejam alcançados. Assim, foram mantidas para estas atividades as ações consideradas na Tab. 81, assim como a sua correlação com as ações do modelo prospectivo.

Tab. 85 – Correlação com a ação do modelo de desempenho

Atividade	Domínio	Categoria	Processo Cognitivo	Código	Nível de Desempenho
33. Cronometrar o tempo	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra

Para a execução da ação incluída nesta etapa, está sendo considerado o agente OP1, introduzido no item 7.1.2.6.1.

Fig. 51 – Sequência de atividades no procedimento operacional (2ª iteração)

7.1.3.3.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 1)

Esta etapa não foi considerada neste ciclo – considerou-se a mesma justificativa apresentada no item 7.1.2.5.2.

7.1.3.3.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 1)

A RB apresentada na Fig. 50 foi revista para considerar as alterações apresentadas nos itens 7.1.3.1 e 7.1.3.3.1, sendo obtida a RB apresentada na Fig. 52. Nesta rede, os nós em vermelho referem-se à atividade acrescentada nesta iteração (nó “S33”, vide item o 7.1.3.1), à ação acrescentada neste ciclo (nó “A_C_5a_16”, vide item o 7.1.3.3.1) e à atividade associada a outros eventos (o nó “S11”, anteriormente associado ao evento #D1, foi associado também aos eventos #A1 e #M1, vide item o 7.1.3.1) – os demais nós foram apresentados na descrição da RB da Fig. 50. As TPC para os nós desta rede estão apresentadas no Apêndice G – onde são indicadas as alterações em relação à RB da Fig. 50. A HEP associada ao nó para a ação acrescentada neste ciclo foi obtida da Tab. 79, da coluna “Mediana”.

Conforme a RB da Fig. 52, a frequência de falha do SRPEC foi calculada em 1,11%. Por meio de inferência bayesiana, considerando a evidência de falha no SRPEC, foi possível encontrar os nós desta RB mais impactados. A Tab. 86 apresenta os resultados obtidos desta forma.

Verifica-se na Tab. 86 que, dada a evidência de falha no SRPEC, e considerando as alterações propostas nesta iteração, os eventos #A1 e o #M1 continuam sendo os mais impactados – agora seguidos pelo evento #D1. Assim, as atividades relacionadas a estes eventos continuam sendo as atividades a serem alteradas para que haja um aumento relativo mais expressivo da confiabilidade do sistema. Quando empregados os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 79, em vez dos dados da coluna “Mediana”, para as ações mais impactadas (relacionadas ao evento #M1), a probabilidade de falha do SRPEC foi estimada em 0,12%. Quando isto foi feito também para as ações relacionadas ao evento #A1, a probabilidade de falha do SRPEC foi estimada em 0,11%. Apesar da proximidade destes resultados com a meta estabelecida no item 2.1.4, optou-se por realizar mais

um ciclo de desenvolvimento de solução, conforme apresentado no próximo item.

Tab. 86 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Inadequado” para a RB da Fig. 52

Nó	Sem evidência de falha do SRPEC	Com evidência de falha do SRPEC	Variação
M1	1,00E-02	9,03E-01	8896,21%
Resfriamento	1,11E-02	1,00E+00	8896,04%
S17	5,00E-03	4,50E-01	8896,00%
A1	5,54E-04	4,99E-02	8895,94%
S12	1,00E-02	9,50E-02	849,88%
S16	4,00E-02	3,80E-01	849,70%
S33	1,00E-01	4,99E-01	399,09%
D1	5,27E-03	2,05E-02	289,90%
S11	2,00E-02	7,71E-02	285,62%
S3	7,00E-03	1,91E-02	172,21%
S5	7,00E-03	1,91E-02	172,21%
S7	7,00E-03	1,91E-02	172,21%
S8	7,00E-03	1,91E-02	172,21%
S10	5,00E-03	1,36E-02	172,20%
D2	3,35E-01	3,49E-01	4,32%
A2	3,19E-01	3,23E-01	1,10%
S20d	4,00E-02	4,04E-02	1,10%
S21d	4,00E-02	4,04E-02	1,10%
S22d	4,00E-02	4,04E-02	1,10%
S29d	5,00E-02	5,06E-02	1,10%
S23d	7,00E-02	7,08E-02	1,10%
S24d	7,00E-02	7,08E-02	1,10%
S26d	7,00E-02	7,08E-02	1,10%
S27d	7,00E-02	7,08E-02	1,10%
S28d	7,00E-02	7,08E-02	1,10%
M2	3,16E-01	3,19E-01	1,10%
S25d	9,00E-02	9,10E-02	1,10%
S15	1,00E-01	1,01E-01	1,10%
S19d	1,00E-01	1,01E-01	1,10%
S30d	1,00E-01	1,01E-01	1,10%
S31d	2,00E-01	2,02E-01	1,10%
S6	7,00E-02	7,01E-02	0,09%
S9	2,00E-01	2,00E-01	0,08%
S13	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S14	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S2	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S4	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S18	5,00E-01	5,00E-01	0,00%
S32d	5,00E-01	5,00E-01	0,00%

Obs.: as linhas hachuradas indicam eventos da árvore da Fig. 46

7.1.3.4 Desenvolvimento de soluções – ciclo 2

7.1.3.4.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 2)

Dentre as atividades relacionadas ao evento #M1 no item 7.1.3.3, a única que não foi associada a uma ação de verificação ou redundante é a atividade 33. Assim,

para esta atividade, foi acrescida uma ação redundante independente da incluída no item 7.1.3.3.1 (Tab. 85), na forma discriminada na Tab. 87. Esta tabela também apresenta a correlação entre a ação incluída e a ação do modelo prospectivo de desempenho humano – esta correlação foi feita da forma descrita no item 7.1.2.5.1.

Fig. 52 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (2º iteração: ciclo 1)

Tab. 87 – Correlação com as ações do modelo prospectivo de desempenho humano

Atividade	Ações	Domínio	Categoria	Processo Cognitivo	Código	Nível de Desempenho
33. Cronometrar o tempo	33. Cronometrar o tempo (OP1)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
	33. Cronometrar o tempo (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra

Para a execução da ação incluída nesta etapa, está sendo considerado o agente OP2 introduzido no item 7.1.2.6.1.

7.1.3.4.2 Etapa 7 – Seleção da maior Confiabilidade (ciclo 2)

Esta etapa não foi considerada neste ciclo – considerou-se a mesma justificativa apresentada no item 7.1.2.5.2.

7.1.3.4.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 2)

A RB apresentada na Fig. 52 foi revista para considerar as alterações apresentadas no item 7.1.3.4.1, sendo obtida a RB na Fig. 53.

Na rede da Fig. 53, o nó em marrom refere-se à ação acrescentada neste ciclo (nó “A_C_5a_17”) – os demais nós já foram apresentados na descrição da RB da Fig. 52. As TPC para os nós desta rede são apresentadas no Apêndice G – onde são indicadas as alterações em relação à RB da Fig. 52. A HEP associada ao nó para a ação acrescentada neste ciclo foi obtida da Tab. 79, da coluna “Mediana”.

Conforme a RB da Fig. 53, a frequência de falha do SRPEC foi calculada em 0,67%. Por meio de inferência bayesiana, considerando a evidência de falha no SRPEC, foi possível encontrar os nós desta RB mais impactados. A Tab. 88 apresenta os resultados obtidos desta forma.

Verifica-se na Tab. 88 que, dada a evidência de falha no SRPEC, e considerando a alteração proposta neste ciclo, os eventos #A1 e o #M1 são os mais impactados – seguidos pelo evento #D1. Quando empregados os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 79, em vez dos dados da coluna “Mediana”, para algumas ações relacionadas ao evento #A1 e #M1 – i.e., relacionadas às atividades mais impactadas de acordo com a Tab. 88 (atividades 11, 17 e 33: nós “A_C_5a_15”, “A_C_5a_16”, “A_C_5a_17”, “A_C_5a_3”, “A_C_5b_3” e “A_P_2_1” na RB da Fig. 53) –, a probabilidade de falha do SRPEC foi estimada em 0,1%. Este resultado atende à meta estabelecida no item 7.1.1.4. Neste trabalho não será proposta a alteração na solução obtida neste ciclo.

Fig. 53 – RB para a avaliação da meta de confiabilidade (2ª iteração: ciclo 2)

A evidência de falha na RB da Fig. 53 demonstra que o evento #E2 é o mais impactado dentre os eventos relacionados diretamente às falhas nos equipamentos – #E1, #E2, #E3 e #E4 –, de forma complementar, quando considerada a evidência de falha na RB da Fig. 47, verifica-se que os equipamentos mais impactados são as

bombas, os sensores de vazão e as conexões. De outra forma, quando considerada a evidência de sucesso no nó “E2” da Fig. 53, a probabilidade de falha no resfriamento cai de 0,1% para 0,05%. Assim, uma alternativa para melhorar as condições do SRPEC seria alterar a configuração de equipamentos e/ou a automação. Esta proposta, no entanto, não será considerada neste trabalho, sendo abordada em um contexto semelhante – porém, para a concepção de um sistema completo – no próximo capítulo desta tese.

Tab. 88 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Inadequado” para a RB da Fig. 53

Nó	Sem evidência de falha do SRPEC	Com evidência de falha do SRPEC	Variação
S17	5,00E-03	7,49E-01	14870,80%
Resfriamento da Água na PEC	6,68E-03	1,00E+00	14870,73%
M1	5,59E-03	8,37E-01	14870,68%
A1	5,54E-04	8,30E-02	14870,68%
S33	1,00E-02	8,31E-02	730,57%
D1	5,27E-03	3,08E-02	484,59%
S11	2,00E-02	1,15E-01	477,45%
S3	7,00E-03	2,72E-02	287,87%
S5	7,00E-03	2,72E-02	287,87%
S7	7,00E-03	2,72E-02	287,87%
S8	7,00E-03	2,72E-02	287,87%
S10	5,00E-03	1,94E-02	287,86%
S12	1,00E-02	2,42E-02	141,75%
S16	4,00E-02	9,66E-02	141,40%
D2	3,35E-01	3,43E-01	2,38%
M2	3,16E-01	3,22E-01	1,84%
A2	3,19E-01	3,25E-01	1,84%
S23d	7,00E-02	7,13E-02	1,84%
S24d	7,00E-02	7,13E-02	1,84%
S26d	7,00E-02	7,13E-02	1,84%
S27d	7,00E-02	7,13E-02	1,84%
S28d	7,00E-02	7,13E-02	1,84%
S25d	9,00E-02	9,17E-02	1,84%
S20d	4,00E-02	4,07E-02	1,84%
S21d	4,00E-02	4,07E-02	1,84%
S22d	4,00E-02	4,07E-02	1,84%
S15	1,00E-01	1,02E-01	1,84%
S19d	1,00E-01	1,02E-01	1,84%
S29d	5,00E-02	5,09E-02	1,84%
S30d	1,00E-01	1,02E-01	1,84%
S31d	2,00E-01	2,04E-01	1,84%
S9	2,00E-01	2,00E-01	0,14%
S6	7,00E-02	7,01E-02	0,14%
S13	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S14	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S2	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S4	1,00E-01	1,00E-01	0,01%
S18	5,00E-01	5,00E-01	0,00%
S32d	5,00E-01	5,00E-01	0,00%

Obs.: as linhas hachuradas indicam eventos da árvore da Fig. 46

Antes de avançar, é interessante ressaltar que o emprego do dado da coluna “Percentil 5%” (da Tab. 79), para a HEP de uma ação, foi associado à evidência de

boas condições para a sua execução – a serem alcançadas durante a operação. Estas condições referem-se aos fatores de desempenho que influenciam o operador de forma significativa, como por exemplo Martins e Maturana (2013): 1) Fatores gerenciais e organizacionais (MOF – *Management and Organizational Factors*): e.g., treinamento, seleção de pessoal; 2) Fatores ambientais: e.g., visibilidade, calor; 3) Fatores internos ao operador: e.g., fadiga, inteligência. Sendo contextuais, estes fatores devem ser avaliados na implantação do procedimento operacional como parte de uma ACH, garantindo as boas condições para a execução das ações às quais foram associadas HEP mais otimistas.

7.1.4 Etapa 9 – Descrição da solução para o sistema

Os resultados apresentados nas etapas anteriores (itens 7.1.3.4.1 e 7.1.3.4.3) propõem que a operação do SRPEC seja realizada por pelo menos dois operadores – i.e., que sejam mantidos dois operadores durante o período em que a PEC necessite do SRPEC –, identificados por OP1 e OP2 na descrição das atividades que devem ser executadas concomitantemente (e.g., Tab. 87). Para a maior independência destes operadores, é proposto que sejam lotados em áreas diferentes da planta (e.g., PC e SC), e que, nas atividades de verificação (e.g., ação 3.2 da Tab. 81), a atuação de um operador ocorra sem a presença do outro.

Os dados da Tab. 88 demonstram que as atividades 2, 4, 6, 9, 13 e 14 apresentam baixo impacto sobre a confiabilidade da operação do SRPEC. Na evidência de falha nestas atividades – sendo mantidos os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 79 para as ações relacionadas às atividades 11, 17 e 33 –, a probabilidade de falha do SRPEC sofre um incremento de apenas 0,22%. Este resultado sugere que estas atividades podem ser simplificadas (ou mesmo eliminadas) sem que a meta de confiabilidade estabelecida no item 7.1.1.4 deixe de ser atendida.

Mediante as seguintes hipóteses, os resultados apresentados nas etapas anteriores podem ser considerados conservadores – esta posição pode ser verificada, por exemplo, nos itens 7.1.1.4 (árvore de eventos e falha de equipamentos) e 7.1.2.5.3 (RB para a avaliação da meta de confiabilidade), no

cálculo da probabilidade de falha do SRPEC:

- A frequência da necessidade de resfriamento $\lambda(EI)$ é 1/ano (vide o item 7.1.1.4);
- Os sistemas de interface (vide o item 7.1.1.1) não exercem influência significativa sobre a operação do SRPEC (com exceção dos componentes considerados nos itens 7.1.1.3 e 7.1.1.4);
- O tempo disponível para a execução das atividades no SRPEC não é uma variável crítica – considerou-se que, na pior condição, no transiente entre a operação em um modo normal e a operação em um modo degradado, a água da PEC atingirá a temperatura limite somente se o transiente durar mais que 38 horas (tempo necessário para a elevação da temperatura de 41°C a 60°C, vide o item 7.1.1.1);
- Os dados de confiabilidade para os componentes do SRPEC são os apresentados na Tab. 67;

Além das incertezas associadas a estas hipóteses, acrescentam-se aos resultados das etapas anteriores as incertezas do modelo prospectivo de desempenho humano adotado na Etapa 5 (vide o item 7.1.2.4). Estas incertezas foram representadas nas funções de probabilidades para as HEP das ações incluídas neste modelo – e.g., ação A_P_1, Fig. 42 do Capítulo 6. Estas funções podem ser utilizadas para estimar a variabilidade da probabilidade de falha do SRPEC.

Pela aplicação do MMC (ROBERT; CASELLA, 2004) na solução da RB apresentada na Fig. 53, foi obtida a variabilidade da probabilidade de falha do SRPEC. Isto foi feito para as seguintes condições: a) variando as HEP de todas as ações da rede (e.g., nó “A_C_3a”) segundo as funções de probabilidades do modelo de desempenho; e b) variando as HEP de todas as ações da rede segundo as funções de probabilidades do modelo de desempenho, exceto para as ações relacionadas às atividades 11, 17 e 33 (ações A_C_5a_15, A_C_5a_16, A_C_5a_17, A_C_5a_3, A_C_5b_3 e A_P_2_1), que mantiveram o valor da HEP segundo a coluna “Percentil 5%” da Tab. 79. Os resultados estão apresentados na Fig. 54 e na Fig. 55, respectivamente para a condição “a” e para a condição “b”.

Fig. 54 – Variabilidade para a $P(\text{falha do SRPEC})$, condição “a”

Fig. 55 – Variabilidade para a $P(\text{falha do SRPEC})$, condição “b”

Para a obtenção das curvas apresentadas nas Figs. 54 e 55, o procedimento a seguir, de solução da RB da Fig. 53 pelo MMC, foi repetido 10^4 vezes (para cada condição): 1) Segundo as distribuições de probabilidades do modelo de desempenho (vide o Apêndice D), a HEP de cada ação foi escolhida de forma aleatória – na condição “b”, isto não foi feito para as ações relacionadas às atividades 11, 17 e 33, que mantiveram a HEP estabelecida segundo a coluna “Percentil 5%” da Tab. 79, e; 2) As etapas a seguir foram repetidas 10^5 vezes: 2.1) Escolha aleatória, segundo a HEP estabelecida na fase anterior, dos estados dos nós das ações – e.g., estado “Fracasso” para o nó “A_C_3a”; 2.2) Escolha aleatória,

segundo as probabilidades estabelecidas na Tab. 71, dos estados dos nós dos eventos relacionados a equipamentos; 2.3) Determinação dos estados dos nós das atividades, segundo os estados dos nós das ações – definidos em 2.1; 2.4) Determinação dos estados dos nós dos eventos relacionados às atividades humanas, de acordo com os estados dos nós das atividades – definidos em 2.3; 2.5) Determinação e registro do estado do nó “Resfriamento da Água na PEC” de acordo com os estados dos nós dos eventos – definidos em 2.2 e 2.4, e; 3) A probabilidade de falha do SRPEC foi estimada pela divisão do número de ocorrência do estado “Falha” por 10^5 .

Ressalte-se que os valores 10^4 e 10^5 , considerados no parágrafo anterior, foram definidos em análise de sensibilidade. Após a implantação em MATLAB® do procedimento descrito, verificou-se que o aumento destes valores não alterou os resultados de forma significativa.

Assim, para a curva da Fig. 54, a mediana foi calculada em $7,13E-03$, o percentil 5% foi calculado em $2,19E-03$, e o percentil 95% foi calculado em $3,09E-02$ – demonstrando que o percentil para $1,00E-3$ é menor que o percentil 5%.

E, para a curva da Fig. 55, a mediana foi calculada em $1,08E-03$, o percentil 5% foi calculado em $8,00E-04$, e o percentil 95% foi calculado em $1,35E-03$. Nesta curva, a probabilidade $1,00E-03$ (definida como meta para a concepção) foi obtida para o percentil 28%.

7.2 COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO

No projeto de sistemas complexos, a consideração do fator humano é fundamental para a obtenção de soluções que apresentem risco e desempenho aceitáveis. A consideração do desempenho humano ainda na fase de concepção tem o potencial de melhorar o controle do risco e dos custos relacionados a um sistema – e que serão observados ao longo de sua vida útil. Para explorar este potencial, torna-se essencial o desenvolvimento de processos quantitativos – e que sejam simples e realistas – para a consideração da confiabilidade humana ainda na concepção. A metodologia descrita no Capítulo 3 foi apresentada com este objetivo, sendo que, como exemplo de aplicação, obteve-se uma concepção para o

procedimento operacional do SRPEC, atendendo às restrições pré-estabelecidas para as características de confiabilidade deste sistema.

Os seguintes aspectos positivos desta metodologia, não citados ao longo do texto, foram identificados nesta aplicação: 1) O uso das RB nos modelos probabilísticos facilitou a priorização dos pontos do projeto que podem ser melhorados, particularmente pela facilidade de realizar a inferência bayesiana; e 2) Mesmo com informações incipientes sobre o contexto operacional, o uso do modelo prospectivo de desempenho humano apresentado nos Capítulos 5 e 6, empregando a taxonomia de Bloom para classificar as ações humanas, tornou simples a associação das ações a serem executadas aos dados quantitativos de confiabilidade disponíveis no modelo.

Por tratar-se da concepção de um procedimento operacional, esta aplicação não explorou plenamente as etapas relacionadas ao levantamento dos componentes que podem compor o sistema e ao estudo de suas funções – Etapas 3 e 4 da metodologia (vide a Fig. 20) –, sendo considerados os dados obtidos na Etapa 1. Ademais, devido à facilidade de associar o operador a uma dada composição de equipamentos pré-estabelecida, não foi necessária a aplicação da Etapa 7 (escolha da maior confiabilidade). Assim, neste processo de concepção, foi acompanhada uma RB que permitiu, nas diferentes etapas, o aproveitamento dos resultados de iterações anteriores.

Outra contribuição importante deste capítulo foi demonstrar algumas formas de tratamento de incerteza durante o uso da metodologia. Respeitando as hipóteses assumidas ao longo das análises e considerando as incertezas relativas aos modelos probabilísticos desenvolvidos neste processo de concepção (vide a descrição no item 7.1.4), procurou-se ponderar resultados conservadores para a avaliação do desempenho do SRPEC. Este conservadorismo poderia ser reduzido, por exemplo, se fosse considerado(a):

- ***Um maior detalhamento dos modelos probabilísticos desenvolvidos:***
seria possível encontrar resultados menores para as probabilidades de falha consideradas neste trabalho – e.g., numa alternativa menos conservadora, as falhas dos equipamentos poderiam ser detalhadas nas RB para que a sua detecção fosse considerada de acordo com o tipo de falha;

- ***Maior flexibilidade para a concepção:*** respeitando a proposta inicial de não alterar os equipamentos do sistema, a hipótese de automação, por exemplo, não foi considerada nesta aplicação. Com a análise dos resultados, no entanto, é possível identificar atividades que poderiam ser automatizadas para a redução da probabilidade de falha na operação do SRPEC – e.g., a atividade 33 seguida pela 17 (discriminadas na Tab. 88) poderia ser automatizada sem alterar significativamente a composição do SRPEC;
- ***Maior detalhamento dos objetivos do sistema:*** ponderando os objetivos definidos na Etapa 2 da metodologia (itens 7.1.2.1 e 7.1.3.1), e em consonância com o modelo prospectivo de desempenho humano obtido por meio da TECHR, foi associada apenas uma ação complexa a cada uma das atividades do procedimento operacional (para cada operador). Com objetivos mais detalhados, em fases mais avançadas do projeto, estas atividades podem ser reavaliadas considerando as ações mais simples que compõem as ações propostas na concepção, e/ou o modelo de desempenho pode ser alterado para considerar os erros específicos que podem ocorrer nestas atividades.

Assim, este capítulo cumpre o objetivo de apresentar a aplicação da metodologia proposta em um caso concreto, empregando um modelo prospectivo de desempenho humano obtido por meio da TECHR na concepção do procedimento operacional de um sistema pré-concebido.

8 CONCEPÇÃO DO SRPEC COMPLETO

Este capítulo refere-se à concepção do SRPEC, pela aplicação da metodologia discutida no Capítulo 3 apoiada pelo modelo prospectivo de desempenho humano apresentado no Capítulo 6, definindo a configuração dos fatores humanos e dos equipamentos que podem compor este sistema. De forma similar à apresentada no Capítulo 7, o SRPEC está sendo concebido para resfriar os compartimentos de uma PEC que estoca os EC recém-removidos de um reator nuclear do tipo PWR, e que ainda produzem calor e mantêm a capacidade de contaminar a água que os resfria. Na falta de refrigeração, este calor pode danificar o revestimento dos EC e expor o seu conteúdo radioativo, contaminando o ambiente de forma severa. A próxima seção apresenta esta aplicação e a seguinte discute os *insights* obtidos neste processo – comparando com os *insights* obtidos na aplicação apresentada no capítulo precedente, que se refere à concepção apenas de um procedimento operacional.

8.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Esta seção apresenta a concepção do SRPEC, com foco na configuração dos fatores humanos e dos equipamentos, conforme a descrição a seguir – as próximas subseções foram organizadas segundo as etapas propostas nesta metodologia.

8.1.1 Etapa 1 – Cenário

O cenário para a concepção do SRPEC refere-se à necessidade de manutenção da temperatura da PEC abaixo de 41°C, sendo que na PEC são depositados EC capazes de elevar sua temperatura. Neste cenário, considera-se que a elevação de temperatura ocorre homogeneamente, sendo que os EC fornecem calor continuamente e não há troca da água da PEC – i.e., a água que entra em contato com o EC é a mesma durante toda a operação. Além de que, como parte do programa de manutenção preventiva, o SRPEC será reparado anualmente,

sendo considerado *as good as new* após este procedimento. A PEC a ser resfriada apresenta-se no interior de um prédio (PC) e não há restrição espacial importante em seu entorno, e em suas proximidades estão instaladas redes de ar comprimido e cabeamento elétrico com abundante capacidade ociosa e disponibilidade. As demais informações obtidas nesta etapa foram organizadas nos dois itens a seguir, tratando, respectivamente, da apresentação das características desejadas do sistema e das restrições para o projeto – limites a serem observados –, incluindo a meta de confiabilidade a ser alcançada na concepção.

8.1.1.1 Características desejadas do sistema

Dentre as características desejadas do SRPEC, e consideradas importantes para a sua concepção, destacam-se:

- **Funções do sistema:** em operação normal ou degradada, refrigerar os compartimentos onde os EC com calor residual significativo estiverem localizados, mantendo a temperatura da água abaixo de 41°C – considera-se que o sistema deve atuar até que a temperatura atinja 37°C. Durante possíveis transientes operacionais, manter a temperatura da água na PEC abaixo de 60°C. Espera-se que a PEC receba uma descarga anual de EC;
- **Compartimentos a serem refrigerados:** o EC pode estar presente em quatro compartimentos da PEC, denominados PEC-I, PEC-II, PEC-III e CT (Canal de Transferência). Destes compartimentos, apenas o CT não precisará de resfriamento ativo – o EC permanecerá pouco tempo neste compartimento. A distribuição do EC nestes compartimentos depende de sua integridade – e.g., o EC danificado é posicionado na PEC-III –, sendo que esta avaliação está fora do escopo deste trabalho. É importante ressaltar que o CT faz a conexão física entre os compartimentos da PEC e que, antes da operação de resfriamento, estes compartimentos são isolados por comportas;
- **Modos operacionais:** com base na possível distribuição de EC na PEC, foram definidos os modos operacionais preliminares para este sistema, conforme apresentados na Tab. 89 – estes modos serão revistos na Etapa

9 da metodologia (vide a seção 8.1.3), de acordo com a solução alcançada. Ressalte-se que, para os modos operacionais em que é previsto o resfriamento de dois compartimentos, a água de um compartimento não é misturada com a água de outro compartimento – isto para que o rejeito radioativo gerado na purificação da água da PEC seja reduzido;

Tab. 89 – Modos operacionais preliminares para o SRPEC

<i>Modo Operacional</i>	<i>Compartimentos Resfriados</i>	<i>Descrição</i>
O	-	<i>Desligado. Equipamentos inativos. Alinhamento para resfriar os compartimentos I & II.</i>
A	PEC-I	<i>Alinhamento para resfriar o compartimento I.</i>
B	PEC-II	<i>Alinhamento para resfriar o compartimento II.</i>
C	PEC-III	<i>Alinhamento para resfriar o compartimento III.</i>
D	PEC-I & PEC-III	<i>Alinhamento para resfriar os compartimentos I & III. Sem mistura da água.</i>
E	PEC-I & PEC-II	<i>Alinhamento para resfriar os compartimentos I & II. Sem mistura da água.</i>

- **Distribuição espacial:** os equipamentos do SRPEC podem ser instalados na SC (Sala de Controle) – equipamentos de monitoração e controle – e no PC (Prédio do Combustível);
- **Tempo de aquecimento e de resfriamento:** considera-se que a temperatura da PEC, sem a atuação do SRPEC, se eleva de 37°C a 41°C em 8 horas e de 41°C a 60°C em 38 horas na pior condição de projeto, i.e., considerando-se a maior temperatura ambiente da série histórica local e a maior potência possível para o EC. Além disto, considera-se que em 10 dias o EC apresentará um calor residual insignificante – que não excede a capacidade natural de dissipação de calor na PEC;
- **Interfaces com outros sistemas:** além do SE (Sistema Elétrico) e do SAC (Sistema de Ar Comprimido), que podem alimentar os equipamentos a serem definidos nas próximas etapas com energia elétrica ou pneumática, os seguintes sistemas relacionados à PEC podem ter interface com o SRPEC: a) SLP (Sistema de Limpeza e Purificação); b) SARS (Sistema de Água de Resfriamento de Segurança); c) SA (Sistema de Amostragem), e; d) SD (Sistema de Drenagem).
- **Procedimento de manutenção:** está prevista a verificação das condições dos equipamentos do SRPEC antes de sua entrada em operação. Neste trabalho, no entanto, o procedimento de manutenção não será desenvolvido, sendo considerado que os equipamentos apresentam-se na condição *as good as new* imediatamente após o procedimento de manutenção – a probabilidade de falha do SRPEC, no entanto, será

calculada em função do tempo decorrido entre esta manutenção e a entrada em operação do SRPEC (neste trabalho, designado como período de espera, está sendo igualado a um ano).

8.1.1.2 Restrições para o projeto

Além das mencionadas características desejadas do sistema, apresentam-se as seguintes restrições para o projeto do SRPEC:

- **Confiabilidade:** a probabilidade de não haver o resfriamento do EC com calor residual significativo deve ser menor que $1,00E-07$ em um ano – esta condição é assumida quando a temperatura da água da PEC ultrapassa 60°C . A frequência de falha do SRPEC deve ser menor que $1,00E-03$ em um ano – i.e., o número esperado de falhas em um ano deve ser menor que $1,00E-03$;
- **Mistura do fluido:** com o objetivo de minimizar a geração de rejeitos, os fluidos dos diferentes compartimentos devem ser resfriados de modo independente – e.g., não será permitido que um mesmo trocador de calor ou trecho de circuito participe no resfriamento concomitante de dois compartimentos;
- **Poluição do ambiente:** visto que a água da PEC poderá apresentar partículas irradiadas – e/ou produtos de fissão –, o SRPEC deve ser projetado de forma a não permitir o contato desta água com o meio ambiente.

O critério de confiabilidade apresentado no primeiro tópico sintetiza a preocupação com a falta de resfriamento do EC devido à falha de diferentes sistemas – e.g., além do SRPEC, sistema elétrico de alimentação, sistema de reposição do inventário da piscina. De acordo com este critério, especificamente para o SRPEC, a frequência de falta de resfriamento deve ser menor que $1,00E-03$ em um ano (ou probabilidade de falha em um ano: espera-se que a PEC receba uma descarga anual de EC, vide a subseção 8.1.1) – sendo esta a meta de confiabilidade para a concepção. Ressalte-se que a falta de resfriamento da água pelo SRPEC não resulta, necessariamente, em falta de resfriamento do EC – a falta

de resfriamento pelo SRPEC é um evento iniciador para outras ações, incluindo a recuperação do próprio SRPEC por manutenção corretiva e o seu emprego em um modo operacional que não respeite o critério de mistura de fluido – para permitir a comparação com o caso anterior (vide o Capítulo 7), estas condições também não serão trabalhadas neste capítulo –, sendo que os modos operacionais normais ou degradados concebidos nas próximas etapas (vide a subseção 8.1.3) respeitam os critérios definidos nesta Etapa 1.

8.1.2 Etapas cíclicas – iteração única

As etapas cíclicas da metodologia são realizadas iterativamente. Esta subseção apresenta os resultados da iteração para a concepção do SRPEC – neste trabalho foi necessária apenas uma iteração para encontrar uma solução satisfatória.

8.1.2.1 Etapa 2 – Análise de tarefas

Para a elaboração de uma sequência de atividades que atenda ao cenário proposto na Etapa 1, foi aplicada a técnica HTA, conforme descrita por Stanton (2006) – o Capítulo 3 apresenta as correlações entre os passos da HTA e as etapas da metodologia de concepção. Inicialmente, com base neste cenário, verifica-se que a função do SRPEC está associada à remoção do calor da água da PEC sem causar alterações significativas em sua composição e quantidade (inventário da PEC) e sem permitir o contato desta água com o ambiente (e.g., mistura com o fluido de outros sistemas, vazamento). Assim, foram definidos os seguintes objetivos primários do SRPEC:

- **Resfriamento da PEC:** para cada modo operacional discriminado na Tab. 89, manter a temperatura da água da PEC abaixo de 41°C;
- **Manter o inventário da PEC:** conter a saída de água para o meio, impedir a entrada excessiva de água e impedir a entrada de elementos que descaracterizem a composição da água da PEC;

- **Segregação dos fluidos:** para os modos operacionais “D” e “E”, impedir a mistura dos fluidos dos compartimentos.

A aplicação da HTA levou à discretização dos objetivos primários do SRPEC e à possibilidade de associar atividades humanas para que estes objetivos sejam alcançados, conforme a Tab. 90.

Tab. 90 – Objetivos do sistema e ações humanas associadas

<i>Primários</i>	<i>Secundários</i>	<i>Terciários</i>	<i>Atividades Humanas</i>
1	1.1	N/D	1.1.1 Projeto
			1.1.2 Instalação
			1.1.3 Inspeção
			1.1.4 Manutenção
	1.2	N/D	1.2.1 Projeto
			1.2.2 Instalação
			1.2.3 Inspeção
			1.2.4 Manutenção
	1.3	1.3.1	1.3.1.1 Identificar o modo operacional
			1.3.1.2 Alinhar sistemas de interface
			1.3.1.3 Alinhar equipamentos do SRPEC
		1.3.2	1.3.2.1 Verificar se a temperatura é próxima de 41°C
			1.3.2.2 Verificar se a temperatura é próxima de 37°C
		1.3.3	1.3.3.1 Ativar o sistema se a temperatura é próxima de 41°C
			1.3.3.2 Desativar o sistema se a temperatura é próxima de 37°C
			1.3.3.3 Decidir atuar no sistema (antes das atividades 1.3.3.1 e 1.3.3.2)
2	2.1	N/D	2.1.1 Projeto
			2.1.2 Instalação
			2.1.3 Inspeção
			2.1.4 Manutenção
	2.2	N/D	2.2.1 Projeto
			2.2.2 Instalação
			2.2.3 Inspeção
			2.2.4 Manutenção
	2.3	N/D	2.2.1 Projeto
			2.2.2 Instalação
			2.2.3 Inspeção
			2.2.4 Manutenção
3	3.1	N/D	3.1.1 Projeto
			3.1.2 Instalação
			3.1.3 Inspeção
			3.1.4 Manutenção
	3.2	N/D	3.2.1 Projeto
			3.2.2 Instalação
			3.2.3 Inspeção
			3.2.4 Manutenção

N/D: Detalhamento de objetivo não desenvolvido até o nível indicado.

Conforme a Tab. 90, os objetivos do SRPEC foram discretizados em até três níveis. Considera-se que o atendimento dos objetivos terciários conduz ao atendimento do objetivo secundário correlacionado, e que o atendimento dos objetivos secundários conduz ao atendimento dos objetivos primários. O objetivo 1.3.3 foi associado tendo em vista que a temperatura da PEC se eleva de 37°C a 41°C em 8 horas (vide o item 8.1.1.1) e que, portanto, o sistema operará de forma intermitente para atingir o objetivo 1. Para os demais objetivos, as atividades humanas foram encontradas considerando o emprego de componentes passivos e,

assim, foram associados às atividades humanas típicas (projeto, instalação, inspeção e manutenção) para gerar e manter as funções destes componentes – ressalte-se que a operação do sistema está sendo considerada no objetivo 1.3, sendo que a atividade humana 1.3.1.2 refere-se apenas à operação dos sistemas de interface limitada aos componentes que serão modelados neste trabalho – nesta etapa, estes componentes ainda não são conhecidos. As atividades de projeto, instalação e manutenção não são consideradas nesta aplicação – estas atividades foram hachuradas na Tab. 90. Dependendo da tecnologia aplicada no SRPEC (e.g., que não resulte em variação significativa do volume de água na PEC), o objetivo 2.2 poderá ser desconsiderado. Neste ponto, é importante ressaltar que as funções de reposição de água e de purificação da PEC são realizadas pelo SLP.

Considerando a precedência entre as atividades e objetivos listados na Tab. 90 – incluindo a possibilidade de execução simultânea –, foi elaborada a sequência de atividades apresentada na Fig. 56. Nesta figura, as atividades destacadas são aquelas em que não se espera a atuação humana, i.e., serão realizadas apenas por equipamentos. As atividades 4, 11, 15 e 16, apesar de não previstas explicitamente na Tab. 90, são correlacionadas às atividades de inspeção – tanto dos componentes relacionados ao alinhamento antes da inserção do EC na PEC (em função dos resultados dos testes pré-operacionais da atividade 4, os operadores têm a opção de não inserir o EC; esta possibilidade também foi ponderada na aplicação no capítulo anterior) quanto dos componentes que exercem a sua função após este evento. Assim, foi assumida a possibilidade de realinhamento do SRPEC, em caso de falha de componentes envolvidos no alinhamento inicial – ressalte-se que, caso não sejam concebidos modos operacionais degradados nas próximas etapas da metodologia, esta possibilidade será desconsiderada. Assim, o retorno à atividade 2 ou a execução das atividades 15 e 16 (casos indicados pelas setas tracejadas) só ocorrerão em caso de anomalia encontrada nas inspeções (atividades 4 ou 11, respectivamente).

8.1.2.2 Etapa 3 – Tecnologia disponível

Esta etapa é dedicada à formação de um banco de dados para os equipamentos aplicáveis ao sistema em desenvolvimento. Em princípio, podem-se

8.1.2.3 Etapa 4 – Funções dos equipamentos

Os dados funcionais e de confiabilidade para os equipamentos considerados na Etapa 3 estão apresentados na Tab. 91. Para facilitar a identificação dos tipos de equipamentos ao longo do texto, foram criados os códigos apresentados na primeira coluna. A terceira coluna da Tab. 91 apresenta as funções destes equipamentos, e a quarta coluna, a respectiva taxa de falha – considera-se uma distribuição exponencial para o tempo de falha destes equipamentos, sendo que a Tab. 91 apresenta o intervalo de confiança de 90%. Estas distribuições podem ser utilizados no ciclo de desenvolvimento de soluções (Etapas 6, 7 e 8 da metodologia) para a comparação das alternativas de solução em relação às incertezas associadas aos dados de desempenho (e.g., uma solução com confiabilidade média mais alta pode ser preterida quando confrontada com outra com média mais baixa mas com dados menos espalhados) – esta comparação não foi necessária neste trabalho. As taxas de falha na Tab. 91 foram obtidas das referências apresentadas na quinta coluna, considerando os diferentes modos de falha dos respectivos equipamentos.

Neste ponto, é importante ressaltar que, além das taxas apresentadas na Tab. 91, os demais dados necessários para definir a confiabilidade dos equipamentos – e.g., comprimento de tubulação, quantidade de conexões, tempo de atuação – serão considerados na Etapa 6 (e Apêndice H), quando os agentes para as ações do sistema serão definidos.

8.1.2.4 Etapa 5 – Funções humanas

Para esta etapa, foi explorado o modelo prospectivo de desempenho humano obtido pela aplicação da TECHR nos Capítulos 5 e 6, de acordo com o seguinte procedimento: 1) classificar a ação segundo a taxonomia de Bloom; 2) pela semelhança de suas classificações – segundo a taxonomia de Bloom –, correlacionar a ação a uma ação genérica do modelo prospectivo de desempenho humano (nas Tabs. 54, 55 ou 57, de acordo com o respectivo domínio); 3) definir o nível de desempenho para a ação segundo o modelo SRK; e 4) tomar a distribuição da HEP apresentada na Tab. 64 para a ação genérica e para nível de desempenho que foram correlacionados à ação.

Tab. 91 – Funções e confiabilidade dos equipamentos para a 1ª iteração

Equipamento		Funções	Dados de Confiabilidade	
Código	Descrição		Taxa Média de Falhas [Incerteza] (/1,00E+6horas)	Ref.**
BB1	Bomba	Conversão da energia mecânica em hidráulica, proporcionando o escoamento da água.	124,59 [2,50; 386,40]	DNV
BC1	Conjunto: motor, transmissão e bomba.	Conversão da energia elétrica em hidráulica, proporcionando o escoamento da água.	104,0 [0,812; 450,0]	AIChE
CC1	Conjunto: controlador de temperatura – sensor e processador.	Detectar e processar a temperatura, comparar com padrões e emitir os sinais para a atuação no sistema.	24,68 [5,88; 54,09]	DNV
CN1	Conexões	Encaminhar a água entre os componentes de circuito hidráulico.	0,57 [0,0099; 2,20]	AIChE
CO1	Controlador digital.	Receber e processar sinais de sensores e emitir os sinais para a atuação no sistema.	68,8 [2,43; 260,0]	AIChE
EV1	Trocador de calor: evaporativo (torre de resfriamento).	Resfriar a água.	9,09 [1,75; 24,7]	AIChE
MG1	Mangueiras	Encaminhar a água entre os componentes de circuito hidráulico.	0,5 [0,0099; 2,20]	AIChE
MO1	Motor	Transformar energia elétrica em energia mecânica, proporcionando o acionamento da bomba.	15,20 [0,0222; 46,70]	AIChE
P1	Painel: botões, cabos e circuitos.	Permitir/impedir a alimentação elétrica quando atuado.	1,75 [0,162; 5,79]	DNV
SA1	Sinal auditivo: buzina e circuito.	Emitir sinal sonoro mediante um estímulo elétrico.	0,77 [0,0272; 2,90]	AIChE
SL1	Sinal luminoso: lâmpada e circuito.	Emitir sinal luminoso mediante um estímulo elétrico.	25,10 [0,436; 97,10]	AIChE
ST1	Sensor de temperatura (transdutor) com mostrador.	Detectar a temperatura e transmitir sinal para o controlador.	97,0 [1,68; 375,0]	AIChE
ST2	Sensor de radiação (transdutor) com mostrador.	Detectar a radiação e transmitir sinal para o controlador.	248,0 [4,31; 959,0]	DNV
ST3	Sensor de vazão (transdutor) com mostrador.	Detectar a vazão e transmitir sinal para o controlador.	7,13 [1,27; 22,4]	AIChE
TB1	Tubos	Encaminhar a água entre os componentes de circuito hidráulico.	1,52E-05/m [2,64E-07; 5,91E-05]/m*	AIChE
TC1	Trocador de calor: casco-tubo.	Resfriar a água.	31,10 [0,0173; 131,0]	AIChE
VA1	Válvula	Controlar a passagem da água (permitindo ou restringindo), conforme acionamento do atuador (homem ou equipamento).	0,152 [0,0141; 0,501]	AIChE
VC1	Conjunto: válvula com atuação por motor elétrico.	Receber o sinal do sistema de controle e regular a passagem da água (permitindo ou restringindo) por meio da conversão de energia elétrica em energia mecânica.	1,36 [0,239; 3,80]	AIChE
VC2	Conjunto: válvula com atuação por solenóide.	Receber o sinal do sistema de controle e regular a passagem da água (permitindo ou restringindo) por meio da conversão de energia elétrica em energia mecânica.	48,70 [0,679; 189,0]	AIChE
VP1	Vaso: pressão atmosférica.	Conter a água.	1,21 [0,021; 4,68]	AIChE

()* O comprimento da tubulação será considerado no ciclo de desenvolvimento de soluções (e.g., vide o Apêndice H);

()** AIChE: American Institute of Chemical Engineers (1989); DNV: Det Norske Veritas (2009)

8.1.2.5 Desenvolvimento de soluções – ciclo 1

Das atividades apresentadas na sequência na Fig. 56, algumas devem ser inteira ou parcialmente realizadas por equipamentos, e outras podem ser realizadas apenas por operadores. Neste primeiro ciclo – Etapas 6, 7 e 8 da metodologia –, considera-se que as atividades 6, 7, 12, 13, 14 e 17 serão realizadas inteiramente por equipamentos. Além de que, considera-se que a atividade 11 será realizada pelos operadores. A execução da atividade 1 depende de fatores que não são considerados nesta aplicação – a identificação do modo operacional depende do estado dos EC a serem resfriados, e a avaliação do estado dos EC não está no escopo desta aplicação –, de modo que, apesar de mantida na sequência, esta atividade não foi considerada nas Etapas 6, 7 e 8 para a quantificação da confiabilidade do SRPEC. As atividades não citadas neste parágrafo envolvem tanto equipamentos quanto operadores. Assim, como as ações humanas são dependentes dos tipos e arranjo dos equipamentos que devem compor o SRPEC, neste primeiro ciclo nas Etapas 6, 7 e 8 da metodologia, serão consideradas as atividades que envolvem somente equipamentos.

8.1.2.5.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 1)

Dentre os sistemas que podem fazer interface com o SRPEC, destacam-se o SE, o SD e o SARS – o SAC não foi considerado nesta iteração e, desta forma, a Tab. 91 não apresenta equipamento que dependa de ar-comprimido. Assim, o SE pode alimentar os componentes ativos do SRPEC, o SD pode conter possíveis vazamentos, e o SARS pode receber o calor removido da água da PEC. Neste primeiro ciclo, será considerado o aproveitamento destes três sistemas. Os demais sistemas podem, em princípio, ser considerados independentes do SRPEC. O SARS, para cada trocador de calor instalado no SRPEC, apresentará uma válvula manual a montante, e duas válvulas manuais a jusante do trocador de calor – garantindo o isolamento de possíveis vazamentos radioativos no trocador de calor. O acionamento do SARS (ou do SE) e a definição da sua configuração não faz parte do escopo desta aplicação, mas o alinhamento destas válvulas será considerado parte da operação do SRPEC. Apesar de a configuração do SD não estar no escopo deste trabalho, está sendo considerada a instalação de canaletas de contenção para

os equipamentos com altas taxas de vazamento externo (e.g., carcaça de bombas e trocadores de calor).

Neste primeiro ciclo foram ponderados os equipamentos envolvidos nas atividades 6, 7, 12, 13, 14 e 17. Considerando apenas os equipamentos apresentados na Tab. 91, algumas possíveis combinações de agentes para a atividade 14 podem ser conferidas na Tab. 92 – para um compartimento da PEC a ser resfriado; a quantidade de cada equipamento é discutida mais adiante. Ressalte-se que nem todos os equipamentos listados na Tab. 91 foram considerados neste ciclo – e.g., a função que poderia ser exercida pelo EV1 será exercida pelo SARS.

Tab. 92 – Possíveis agentes para a atividade 14

<i>Atividade</i>	<i>Possíveis Agentes</i>
14 <i>Remover o calor da água da PEC</i>	<i>PI + BC1 + TC1 + TB1 + CN1 + MG1</i> <i>Alimentado pelo SE, o conjunto BC1 faz o bombeamento da água da PEC para o TC1 que, após a transferência de calor para o SARS, retorna à PEC – circuito com mangotes e tubos.</i>
	<i>PI + BC1 + TC1 + TB1 + CN1</i> <i>Alimentado pelo SE, o conjunto BC1 faz o bombeamento da água da PEC para o TC1 que, após a transferência de calor para o SARS, retorna à PEC – circuito com tubos.</i>
	<i>PI + MO1 + BB1 + TC1 + TB1 + CN1 + MG1</i> <i>Alimentado pelo SE, o motor MO1 aciona a bomba BB1 que faz o bombeamento da água da PEC para o TC1 que, após a transferência de calor para o SARS, retorna à PEC – circuito com mangotes e tubos.</i>
	<i>PI + MO1 + BB1 + TC1 + TB1 + CN1</i> <i>Alimentado pelo SE, o motor MO1 aciona a bomba BB1 que faz o bombeamento da água da PEC para o TC1 que, após a transferência de calor para o SARS, retorna à PEC – circuito com tubos.</i>

Com exceção das linhas a montante das bombas B1 e B2, que devem ser compostas por tubos, os equipamentos podem ser ligados por mangotes ou tubos – com os mangotes, espera-se que haja flexibilidade no posicionamento dos equipamentos do SRPEC. Como a distância entre os equipamentos é indefinida – i.e., sua distribuição física ainda não foi definida –, foram considerados 5 mangotes para o agente MG1, e 18 conexões e 9 trechos de tubulação de 10 metros para os agentes CN1 e TB1, respectivamente (a montante e/ou a jusante da bomba, independentemente da combinação de agentes da Tab. 92).

Em relação às atividades 6 e 7, pode-se considerar que as partes dos componentes listados na Tab. 92 que contêm a água extraída da PEC podem, de forma passiva, impedir o seu contato com o meio ambiente e impedir a entrada de elementos estranhos na PEC (via SRPEC) – desde que estas partes se mantenham íntegras. Desta forma, não foram definidos agentes específicos para estas atividades. Além disto, considerando que o circuito formado pelos componentes apresentados em cada linha da Tab. 92 esteja repleto de água antes do início da operação, não ocorre a variação significativa do inventário da PEC quando o SRPEC

é acionado. Assim, também não foi definido um agente específico para a atividade 13.

Conforme apresentado na Tab. 92, o TC1 faz a transferência do calor da água da PEC para o SARS, que dissipa o calor no ambiente. Desta forma, não foi definido um componente no SRPEC para a atividade 17.

Para impedir a mistura de água de dois compartimentos – resfriados concomitantemente – e respeitar os modos operacionais apresentados na Tab. 89, o SRPEC pode ser formado por dois circuitos que operam de forma independente. A Fig. 57 apresenta o esquema de uma possível solução.

Fig. 57 – Esquema para o SRPEC (ciclo 1)

O arranjo na Fig. 57 apresenta as válvulas V1, V2, V3 e V4 que, alinhadas adequadamente, permitem o isolamento do PEC-II ou do PEC-III durante o resfriamento de um destes compartimentos. O PEC-I está ligado a um circuito exclusivo. Assim, as válvulas V1, V2, V3 e V4 são os equipamentos envolvidos na atividade 12 – as válvulas V5, V6, V7, V8, V9 e V10 pertencem ao SARS, conforme mencionado no primeiro parágrafo deste tópico, e, apesar de relacionadas à atividade 17 (que considera a sua operação), não são equipamentos modelados neste trabalho.

Para cada circuito apresentado na Fig. 57, considera-se o tempo de missão de 80 horas – calculado considerando 8 horas para a água do compartimento aquecer de 37°C a 41°C, 10 dias para que o calor do EC seja insignificante e 4 horas para o SRPEC resfriar a água da PEC de 41°C a 37°C (este dado se baseia

no sistema apresentado no Capítulo 7). Ademais, considera-se, de forma conservadora, que a quantidade de conexões, tubos e mangotes seja a mesma para ambos os circuitos.

8.1.2.5.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade – e Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 1)

Nesta avaliação, considerou-se a necessidade de alinhar o sistema de acordo com o modo operacional “E” (vide a Tab. 89) – assume-se que os outros modos operacionais apresentarão resultados de confiabilidade iguais ou maiores que este modo.

Com base nos dados apresentados nas etapas anteriores, desenvolveu-se a RB reproduzida na Fig. 58, composta pelos seguintes nós:

- a) Nós em azul: representam o sucesso ou o fracasso dos agentes nas atividades 1, 6, 7, 12, 13, 14 e 17, que estão sendo modeladas neste ciclo – sendo considerado que a atividade 1 seja bem-sucedida e que as demais atividades são realizadas exclusivamente por equipamentos (conforme discutido na introdução do item 8.1.2.5);
- b) Nós em laranja: representam os equipamentos que podem compor o SRPEC – selecionados entre os listados na Tab. 91 (vide os códigos nesta tabela);
- c) Nó em verde: apresenta as quatro combinações de agentes avaliadas neste ciclo, conforme listadas na Tab. 92;
- d) Nós em violeta: apresentam os estados dos sistemas que fazem interface com o SRPEC – consideram-se nulas as probabilidades de falha destes sistemas (estes nós foram incluídos de forma ilustrativa; não foi incluído um nó para o SD); e) nó em vermelho: apresenta os estados do SRPEC, e;
- f) Nós em cinza: apresentam os estados das funções de bombeamento, encaminhamento do fluido, e a integridade do circuito formado pelas estruturas que contêm o fluido – e.g., tubos e conexões. Entre os nós relacionados a equipamentos (em laranja), o índice (e.g., índice 2 do nó “BB1_2”) faz referência aos equipamentos apresentados na Fig. 57 (e.g., índice 2 em B2) – assim, por exemplo, o nó “BB1_2” refere-se à bomba B2 indicada na Fig. 57, i.e., a função da bomba B2 pode ser exercida por uma

bomba do tipo BB1.

Para os demais nós, o índice (e.g., índice 1 em “Encaminhamento_1”) relaciona o nó a um dos circuitos apresentados na Fig. 57 – o índice 1 refere-se ao circuito 1 (que resfia o PEC-I) e o índice 2 refere-se ao circuito 2 (que resfia o PEC-II ou o PEC-III). A TPC para cada nó desta rede foi apresentada no Apêndice H. Não foram incluídas ações humanas na RB da Fig. 58. Neste ciclo, considera-se que as ações humanas foram realizadas adequadamente.

Fig. 58 – RB para o SRPEC (ciclo 1)

No desenvolvimento da RB na Fig. 58, considerou-se que o SRPEC não conterá a saída de água para o meio (atividade 6) e não manterá o volume da PEC

dentro dos limites (atividade 13) se ocorrer um vazamento a jusante da bomba (vide as TPC para estas atividades no Apêndice H) – os componentes do SRPEC serão instalados acima do nível da PEC e, para que ocorra o fracasso nas atividades 6 e 13, será necessário o bombeamento e haverá o vazamento somente nos trechos com pressão maior que a atmosférica. De forma complementar, considera-se que ocorrerá a entrada de elementos estranhos (falha na atividade 7) se ocorrer a falha a montante da bomba (vide as TPC para esta atividade no Apêndice H). Para os eventos discutidos neste parágrafo, a possibilidade de vazamento para o meio na carcaça de trocadores de calor, de bombas e de válvulas foi desconsiderada – não sendo modelada na RB na Fig. 58 –, isto porque está sendo considerado o sucesso do SD. Além disso, a entrada de elementos estranhos devido à falha das válvulas posicionadas a jusante da bomba foi considerada desprezível, não sendo modelada na RB na Fig. 58.

Ainda no desenvolvimento da RB na Fig. 58, considerou-se a mistura de fluido (falha na atividade 12) se ocorrer o vazamento nas válvulas V2 ou V4 (“falha aberta”) ou nos tubos dos trocadores de calor (TC1 ou TC2), sendo considerado o modo operacional “E” – esta possibilidade está sendo ponderada nos nós “Encaminhamento 1” e “Encaminhamento 2”, nos estados “Mistura” e “Mistura e Obstrução”. Além disto, considerou-se que haverá a falta de resfriamento (falha na atividade 14) se não houver bombeamento ou se houver alguma obstrução que impeça a circulação do fluido para o PEC-I ou para o PEC-II – a possibilidade de obstrução está sendo considerada nos nós “Encaminhamento 1” e “Encaminhamento 2”, nos estados “Obstrução” e “Mistura e Obstrução”. Como proposto na Etapa 6 (item 8.1.2.5.1) para a atividade 17, considera-se que o SARS é o responsável pela dissipação de calor no ambiente.

Além dos resultados já mencionados das falhas nas atividades, para o nó “SRPEC” considerou-se que a falha nas atividades 1, 6, 7, 12, 13, e, 17 levam à perda de resfriamento – assim, de forma conservadora, além do fracasso no cumprimento da atividade 14, foi considerada a impossibilidade de resfriamento devido a outros fatores (relacionados às falhas nas atividades mencionadas).

Dentre as combinações de equipamentos apresentadas no nó “CICLO_1”, a que apresenta a maior confiabilidade é a referente ao estado “P1_BC1_TC1_CN1_VA1” – esta conclusão foi obtida considerando a evidência de

falha do SRPEC, conforme a Fig. 59. Este estado refere-se à combinação na segunda linha da Tab. 92. Se for considerada a evidência deste estado na RB da Fig. 58, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em $9,70E-01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em $2,96E-02$ (composta pela soma das probabilidades dos estados “Falha resfriamento” e “Falha resfriamento e outras”) e a probabilidade de outras falhas calculada em $6,62E-03$. Ressalte-se que os resultados reproduzidos na Fig. 58 referem-se à RB sem nenhuma evidência. Visto que foi considerado o sucesso nas atividades humanas, verifica-se que esta solução não atende ao critério de confiabilidade para o SRPEC (probabilidade de falha menor que $1.00E-03$; vide o item 8.1.1.2).

Fig. 59 – RB da Fig. 58 com a evidência de falha no SRPEC

Ainda na RB da Fig. 58, considerando o estado “P1_BC1_TC1_CN1_VA1” para o nó “CICLO_1” e a evidência de falha de resfriamento, verifica-se que os nós que mais contribuem para a probabilidade de falha no resfriamento são os relativos às bombas (BC1_1 e BC1_2), aos trocadores de calor (TC1_1 e TC1_2) e às conexões (CN1_1 e CN1_2) – com o mesmo impacto para equipamentos de circuitos diferentes –, conforme a Tab. 93. De outra forma, se for considerado o estado “Sucesso” neste grupo de equipamentos (bombas, trocadores de calor e conexões), a probabilidade de falha no resfriamento cai duas ordens de grandeza (igual a 1,89E-04), sugerindo a necessidade de incorporar um circuito redundante aos apresentados na Fig. 57.

Tab. 93 – Probabilidade de “Falha” ou “Obstrução” para os equipamentos na Fig. 58

Nó	Sem evidência de falha do SRPEC	Com evidência de falha do SRPEC	Variação
TC1_1	2,48E-03	1,07E-01	4227%
TC1_2	2,48E-03	1,07E-01	4227%
CN1_1	8,24E-04	3,56E-02	4220%
CN1_2	8,24E-04	3,56E-02	4220%
BC1_1	8,29E-03	3,58E-01	4216%
BC1_2	8,29E-03	3,58E-01	4216%
TB1_1	1,10E-07	4,75E-06	4216%
TB1_2	1,10E-07	4,75E-06	4216%
P1_1	1,40E-04	6,04E-03	4216%
VA1_1	1,22E-05	5,27E-04	4216%
VA1_3	1,22E-05	5,27E-04	4216%
MO1_1	1,22E-03	1,22E-03	0%
MO1_2	1,22E-03	1,22E-03	0%
BB1_1	9,92E-03	9,92E-03	0%
BB1_2	9,92E-03	9,92E-03	0%
MG1_1	2,00E-04	2,00E-04	0%
MG1_2	2,00E-04	2,00E-04	0%
VA1_2	1,22E-05	1,22E-05	0%
VA1_4	1,22E-05	1,22E-05	0%

8.1.2.6 Desenvolvimento de soluções – ciclo 2

Além das atividades consideradas no primeiro ciclo desta iteração (item 8.1.2.5), neste ciclo foram ponderadas as atividades 11, 15 e 16. Estas atividades, no entanto, não foram associadas a possíveis agentes (Etapa 6) – neste ciclo foram associados agentes apenas às atividades consideradas no ciclo anterior, i.e., às atividades que envolvem somente equipamentos.

8.1.2.6.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 2)

Neste segundo ciclo, os possíveis sistemas de interface com o SRPEC foram considerados da mesma forma que no ciclo anterior. Além de que, foram mantidos

os possíveis agentes para as atividades 6, 7, 12, 13, 14 e 17. Para a atividade 14, as combinações de agentes podem ser conferidas na Tab. 92. Assim, incorporando a sugestão apresentada no ciclo anterior (circuito redundante aos apresentados na Fig. 57), para impedir a mistura de água de dois compartimentos – resfriados concomitantemente – e respeitar os modos operacionais apresentados na Tab. 89, o SRPEC pode ser formado por três circuitos que operam de forma independente. A Fig. 60 apresenta o esquema de uma possível solução.

Fig. 60 – Esquema para o SRPEC (ciclo 2)

No arranjo da Fig. 60, podem ser identificados: a) o circuito 1, que contém a bomba B1 e o trocador de calor TC1, e que pode resfriar o PEC-I; b) o circuito 2, que contém a bomba B2 e o trocador TC2, e que pode resfriar o PEC-II ou o PEC-III (dependendo do alinhamento das válvulas V1, V2, V3 e V4, relacionadas à atividade 12), e; c) o circuito 3, que contém a bomba B3 e o trocador TC3, e que pode resfriar um dos três compartimentos (dependendo do alinhamento das válvulas V11, V12, V13, V14, V15 e V16, relacionadas à atividade 12). As válvulas V5, V6, V7, V8, V9, V10, V17, V18 e V19 pertencem ao SARS e estão relacionadas à atividade 17.

8.1.2.6.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade – e Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 2)

Com base nos dados apresentados nas etapas anteriores (inclusive no que se refere ao modo operacional considerado), foi desenvolvida a RB reproduzida na Fig.

61. Os nós que compõem esta rede são semelhantes aos que compõem a RB na Fig. 58 – i.e., podem ser descritos de forma semelhante. Acrescentam-se à RB da Fig. 61, no entanto, os nós relativos ao circuito 3 – podem ser identificados pelo índice 3 (e.g., “Bombeamento_3”) ou, se relativos a equipamentos, pelos índices da Fig. 60 (e.g., “VA1_11”, em relação à válvula V11) –, os nós “CIRCUITO_1” e “CIRCUITO_2” (em branco na Fig. 61), e os nós para as atividades 11, 15 e 16.

O preenchimento das TPC dos nós relativos ao circuito 3 ocorreu de forma análoga ao preenchimento das TPC dos nós relativos aos demais circuitos (vide o item 8.1.2.5.2). Considerou-se, no entanto, o alinhamento do circuito 3 para resfriar o PEC-I, sendo necessária a abertura das válvulas V11 e V14 e fechamento das V12, V13, V15 e V16 – i.e., considerou-se a falha no circuito 1, sendo que não há diferença nos resultados da RB em função desta escolha (se fosse considerado o alinhamento do circuito 1 para resfriar o PEC-II, os resultados seriam idênticos).

O nó “CIRCUITO_1” (em branco na Fig. 61) apresenta como estados o sucesso do circuito 1 (“Sucesso”) e a necessidade de sua substituição (“Falha_troca”) pelo circuito 3 – o nó “CIRCUITO_2” apresenta os mesmos estados, sendo relativo ao circuito 2. Os nós para as atividades 11, 15 e 16 (em azul na Fig. 61) foram incluídos na rede devido à necessidade de realinhar o SRPEC (e os sistemas de interface) em caso de falha do circuito 1 ou de falha do circuito 2. No desenvolvimento da RB, considerou-se que a falha na atividade 11 implica em falha no realinhamento do sistema (falha nas atividades 15 e 16: o circuito 3 não entrará em operação) e na continuação da operação do circuito defeituoso (circuitos 1 ou 2) – neste ciclo, no entanto, está sendo atribuída a probabilidade zero à falha nestas atividades. Assim, as TPC para as demais atividades (6, 7, 12, 13 e 14) foram preenchidas de acordo com os estados das atividades 11, 15 e 16 e dos nós “CIRCUITO_1” e “CIRCUITO_2” – além dos modos de falha de cada circuito (nós em cinza), já apresentados no item 8.1.2.5.2. A TPC para cada nó desta rede foi apresentada no Apêndice I.

O estado do nó “CICLO_2” que apresenta a maior confiabilidade é o “P1_BC1_TC1_CN1_VA1” – este resultado foi obtido considerando a evidência de falha do SRPEC. Este estado refere-se à combinação na segunda linha da Tab. 92 – trata-se da mesma combinação obtida no primeiro ciclo (vide o item 8.1.2.5.2). Se for considerada a evidência deste estado na RB da Fig. 61, a probabilidade de sucesso

do SRPEC é calculada em $9,99\text{E-}01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em $7,97\text{E-}04$ (sendo a soma das probabilidades dos estados “Falha resfriamento” e “Falha resfriamento e outras”) e a probabilidade de outras falhas (e.g., mistura de fluido) calculada em $1,49\text{E-}04$ (probabilidade do estado “Falha resfriamento e outras”). Ressalte-se que os resultados reproduzidos na Fig. 61 referem-se à RB sem nenhuma evidência. Assim, considerando o sucesso nas atividades da sequência apresentada na Fig. 56 não ponderadas neste ciclo, verifica-se que esta solução (representada pelo estado “P1_BC1_TC1_CN1_VA1”) atende ao critério de confiabilidade para o SRPEC (probabilidade de falha menor que $1.00\text{E-}03$; vide o item 8.1.1.2).

Fig. 61 – RB para o SRPEC (ciclo 2)

8.1.2.7 Desenvolvimento de soluções – ciclo 3

Neste ciclo foram definidos os agentes para as atividades 5, 8, 9, 10 e 11 da sequência apresentada na Fig. 56 – estas atividades podem ser realizadas tanto por equipamentos quanto pelo elemento humano. Isto foi feito considerando o arranjo apresentado na Fig. 60 e a combinação de agentes apresentada na segunda linha da Tab. 92 – i.e., considerando as soluções encontradas no ciclo 2 para as atividades 1, 6, 7, 12, 13, 14 e 17. Assim como nos ciclos anteriores, nas avaliações de desempenho (Etapas 7 e 8 da metodologia) deste ciclo e dos consequentes, será considerado o modo operacional “E” (vide a Tab. 89).

8.1.2.7.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 3)

Considerando possíveis ações humanas e os equipamentos presentes na Tab. 91, foram encontrados alguns possíveis agentes para as atividades 5, 8, 9 e 10. A correlação destas atividades com as combinações destes agentes foram apresentadas na Tab. 94 – as ações humanas podem ser identificadas pelo código HE; os agentes para a atividade 11 foram considerados mais adiante, na Tab. 95. No desenvolvimento destas atividades, considerou-se que o alinhamento das válvulas foi executado corretamente, tanto nas atividades 2 e 3 (antes ou depois da atividade 4) quanto nas atividades 15 e 16, em caso de falha de equipamento observada após a inserção do EC na PEC (na atividade 11).

A atividade 5 pode ser realizada por equipamentos ou pelo operador auxiliado por sensores de temperatura (com mostradores) – ação humana HE1 na Tab. 94, correlacionada à ação do modelo prospectivo de desempenho humano na Tab. 96. Esta atividade refere-se à verificação da temperatura dos compartimentos da PEC e da sua tendência (de aumento ou redução) – para isto, sensores de temperatura devem ser instalados diretamente nos compartimentos da PEC, de forma que a temperatura monitorada seja a do próprio compartimento. Esta atividade não inclui a verificação da alteração do nível da piscina – a alteração apreciável do nível da piscina (em escala instalada em cada compartimento) é uma anomalia a ser detectada nas atividades 4 ou 11, após o acionamento do SRPEC.

A atividade 8 refere-se à decisão de ativar o SRPEC em função de a temperatura tender a ultrapassar 41°C ou desativar o SRPEC se estiver próxima de

37°C, com tendência de queda. Caso a atividade 5 seja executada pelo elemento humano, considera-se que a atividade 8 também será executada pelo elemento humano. A Tab. 94 apresenta as ações humanas HE2 e HE3 para esta atividade. A ação HE3 se diferencia da ação HE2 porque, neste caso, além da disponibilidade dos resultados da ação HE1, é pressuposto que a decisão será tomada mediante um sinal sonoro de alta temperatura. As ações HE2 e HE3 foram correlacionadas às ações do modelo prospectivo de desempenho humano na Tab. 96.

Tab. 94 – Possíveis agentes para as atividades 5, 8, 9 e 10 (ciclo 3)

Combinações	Atividades				Descrição
	5	8	9	10	
ST1+HE1	X	-	-	-	ST1: a temperatura da água do compartimento é detectada e apresentada em um mostrador; HE1: o operador lê o mostrador e compara a temperatura com os limites de 37°C e 41°C.
ST1+HE1+SA1	X	-	-	-	ST1: a temperatura da água do compartimento é detectada e apresentada em um mostrador; um sinal é enviado para o SA1, caso a temperatura seja superior a 41°C; HE1: o operador lê o mostrador de temperatura e compara com os limites de 37°C e 41°C; SA1: um sinal sonoro é emitido enquanto a temperatura do compartimento for superior a 41°C.
ST1+CO1	X	X	X	X	ST1: a temperatura da água do compartimento é detectada e um sinal é enviado para o CO1; CO1: o sinal do ST1 é processado e: a) caso a temperatura da água seja inferior a 37°C (ou próxima, com tendência de queda), um sinal de desativação das bombas do SRPEC para o respectivo compartimento é enviado ao P1, que corta a energia destas bombas; ou b) caso a temperatura da água seja superior a 41°C (ou próxima, com tendência de aumento), um sinal de ativação das bombas do SRPEC para o respectivo compartimento é enviado ao P1, que energiza estas bombas.
CC1	X	X	X	X	CC1: a temperatura da água do compartimento é detectada, a informação é processada e: a) caso a temperatura da água seja inferior a 37°C (ou próxima, com tendência de queda), um sinal de desativação das bombas do SRPEC para o respectivo compartimento é enviado ao P1, que corta a energia destas bombas; ou b) caso a temperatura da água seja superior a 41°C (ou próxima, com tendência de aumento), um sinal de ativação das bombas do SRPEC para o respectivo compartimento é enviado ao P1, que energiza estas bombas.
HE2	-	X	-	-	HE2: o operador toma a decisão de: a) ativar as bombas do SRPEC (para o respectivo compartimento) caso a temperatura ultrapasse ou tenda a ultrapassar 41°C (após o sinal sonoro); ou b) desativar as bombas do SRPEC (para o respectivo compartimento) caso a temperatura seja inferior ou tenda a ser inferior a 37°C.
HE3	-	X	-	-	HE3: o operador toma a decisão de: a) ativar as bombas do SRPEC (para o respectivo compartimento) caso a temperatura ultrapasse ou tenda a ultrapassar 41°C; ou b) desativar as bombas do SRPEC (para o respectivo compartimento) caso a temperatura seja inferior ou tenda a ser inferior a 37°C.
HE4	-	-	X	X	HE4: o operador atua no painel local P1 para ativar/desativar a circulação no SRPEC (no circuito dedicado ao respectivo compartimento).

As atividades 9 e 10 referem-se, respectivamente, a desativar e ativar as bombas do SRPEC. Na ativação, estas bombas estão em *standby* – i.e., foram alinhadas na atividade 3. Quando realizadas pelo elemento humano, as ações nestas atividades são consideradas psicomotoras, com atuação manual nas botoeiras instaladas no P1 – na Tab. 94, trata-se da ação humana HE4; correlacionada à ação do modelo prospectivo de desempenho humano (vide a seção 6.3) na Tab. 96. Caso sejam automatizadas, referem-se ao sinal enviado pelo controlador ao P1. Conforme considerado em outras atividades, o P1 cumpre as funções de permitir ou impedir a alimentação elétrica das bombas, de forma que as funções de ativação e desativação definidas neste parágrafo são do elemento

humano, diretamente nas botoeiras do P1, ou do controlador, enviando o sinal ao P1.

Tab. 95 – Possíveis agentes para a atividade 11 (ciclo 3)

Combinações	Atividades		Descrição
	11A	11B*	
ST1+HE5	X	-	ST1: a temperatura da água do compartimento é detectada e apresentada em um mostrador (sensor de referência); HE5: o operador avalia os equipamentos de controle de temperatura e, em caso de anomalia, aciona os responsáveis pela manutenção corretiva.
ST3+HE6	-	X	ST3: a vazão no circuito é detectada e apresentada em um mostrador; HE6: o operador verifica os equipamentos que fazem parte do processo de resfriamento – os sensores de vazão são utilizados para verificar o correto bombeamento e encaminhamento do fluido pelo SRPEC – e, em caso de anomalia, parte para a atividade 15.

(*) Está sendo considerado, em princípio, que a pressão no SARS é maior que no SRPEC. Assim, em caso de vazamento no trocador de calor, ocorrerá o aumento no nível da PEC.

Tab. 96 – Possíveis ações humanas no ciclo 3: ações do modelo prospectivo

Ações Humanas	Domínio	Categoria	Processo Cognitivo	Código	Nível de Desempenho
HE1	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
HE2	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A_C_5b	Conhecimento
HE3	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A_C_5b	Conhecimento
HE4	Psicomotor	Movimento Básico	-	A_P_2	Habilidade
HE5	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
HE6	Cognitivo	Analisar	Diferenciar	A_C_4a	Conhecimento

Neste ponto é importante ressaltar que, caso a atividade 5 envolva o elemento humano, os possíveis agentes apresentados na Tab. 94 para as atividades 8, 9 e 10 envolvem apenas o elemento humano. Apresentaram-se, assim, quatro possíveis conjuntos de agentes para estas atividades: 1) ST1+HE1+HE3+HE4; 2) ST1 +HE1+HE2+SA1+HE4; e 3) ST1+CO1; e 4) CC1.

A atividade 11 refere-se à inspeção de componentes ativos e passivos. Estes componentes podem ser organizados em dois grupos: a) equipamentos que participam do controle da temperatura – considerados na Tab. 94, e; b) equipamentos que fazem parte do processo de resfriamento – considerados no ciclo 2. Em caso de falha dos equipamentos que fazem parte do processo de resfriamento – e.g., falha no bombeamento –, pode ocorrer a necessidade de realinhar o SRPEC, com a entrada do circuito 3 em operação. Em caso de falha de um equipamento de controle de temperatura, o realinhamento não é necessário. Neste caso, no entanto, será considerada uma ação de manutenção do equipamento defeituoso (e.g., substituição) – o seu desempenho, no entanto, não foi avaliado neste trabalho, sendo assumida a realização bem-sucedida desta ação de manutenção. Sendo assim, para a atividade 11, foram consideradas as combinações de agentes apresentadas na Tab. 95 – as ações humanas HE5 e HE6 foram correlacionadas às

ações do modelo prospectivo de desempenho humano na Tab. 96.

Caso fossem realizadas de forma intermitente, as ações associadas às atividades 5, 8, 9 e 10 poderiam ser classificadas em categorias inferiores do modelo prospectivo de desempenho humano – e.g., a ação HE1 poderia referir-se à execução repetida de ações independentes classificadas no domínio “cognitivo”, na categoria “entender” e no processo cognitivo “interpretar”, com código A_C_2a no modelo (vide a Tab. 54). Estas atividades, no entanto, realizam-se de forma contínua durante o tempo em que o EC produz calor residual significativo (10 dias) e, neste período, o contexto para a execução destas atividades pode ser alterado, afetando o desempenho do operador. Considerando este ambiente, as ações na Tab. 96 foram classificadas em categorias mais complexas. Para estas ações, a possibilidade de considerar uma composição de ações de classificações inferiores poderia ser explorada se as dependências entre estas ações mais simples fossem reproduzidas no modelo probabilístico em RB (Etapa 7, item 8.1.2.7.2). Isto exigiria informações quantitativas (e.g., probabilidades condicionadas) não disponíveis nesta fase da concepção do SRPEC.

Os dados de confiabilidade para as ações humanas consideradas na Tab. 96 foram apresentados na Tab. 64 (de acordo com os códigos presentes na penúltima coluna da Tab. 96).

8.1.2.7.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade – e Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 3)

A RB apresentada na Fig. 62 foi desenvolvida partindo da RB apresentada na Fig. 61, e considerando as combinações de agentes descritas no item 8.1.2.7.1 – de forma análoga aos ciclos anteriores, os tipos de equipamento representados pelos nós desta RB podem ser identificados pela primeira parte de sua nomenclatura (e.g., o nó “ST1_1” refere-se a um sensor de temperatura) – a segunda parte refere-se a um equipamento específico (tomando o modo “E” como referência, o nó “ST1_1” refere-se ao sensor instalado na PEC-I, e o “ST1_2” ao instalado na PEC-II). Nota-se nesta RB que, com exceção dos nós “Atividade11” e “SRPEC”, todos os nós da RB na Fig. 61 foram mantidos inalterados. Assim, para compactar este capítulo, o Apêndice J apresenta as TPC para a RB da Fig. 62 apenas para os nós acrescentados ou alterados – em relação à Fig. 61 –, e o texto a seguir descreve o

mesmo conjunto de nós.

Os nós acrescentados na RB da Fig. 62 referem-se à execução das atividades de acompanhamento e controle da temperatura dos compartimentos da PEC após a introdução do EC, assim como à inspeção e à correção do mau funcionamento do sistema. Desta forma, os nós para as atividades 5, 8, 9, 10 e 11 (indicados em azul na RB da Fig. 62) têm suas interdependências representadas nas conexões da rede. Especificamente para a atividade 11, são apresentados dois nós, nomeados “Atividade11A” e “Atividade11B”. O nó “CICLO_3” (em verde na Fig. 62) apresenta as quatro combinações de agentes avaliadas neste ciclo, conforme listadas no item 8.1.2.7.1.

O nó “Atividade11A” refere-se à parte da atividade 11 concernente aos equipamentos que participam do controle de temperatura – considerados na Tab. 95. Na RB da Fig. 62, considera-se que o sucesso nesta atividade ocorrerá se houver o sucesso do operador na ação HE5 (nó “A_C_5a_1”) – vide as correlações nas Tabs. 95 e 96 –, e não houver falha em seus equipamentos de referência – é considerado um para cada compartimento monitorado; representados pelos nós “ST1_3” e “ST1_4” – em relação ao modo “E”, o nó “ST1_3” é relativo ao sensor de referência para o PEC-I, e o “ST1_4” para o PEC-II).

O nó “Atividade 11B” refere-se à parte da atividade 11 concernente aos equipamentos que participam do processo de resfriamento – considerados no ciclo 2 (item 8.1.2.6). Na RB da Fig. 62, considera-se que o sucesso nesta atividade ocorrerá se houver o sucesso do operador na ação HE6 (nó “A_C_4a”) – vide as correlações nas Tabs. 95 e 96 –, e não houver falha nos sensores de vazão – é considerado um para cada circuito monitorado; representados pelos nós “ST3_1” e “ST3_2” – em relação ao modo “E”, o nó “ST3_1” é relativo ao sensor para o circuito 1, e o “ST3_2” para o circuito 2.

Para a atividade 5, representada pelo nó “Atividade5”, foi considerado o sucesso quando houver o sucesso nas ações humanas e equipamentos envolvidos, para cada combinação de agentes – estados do nó “CICLO_3”, na RB da Fig. 62 –, da seguinte forma: 1) ST1+HE1+HE3+HE4: sucesso nos nós “A_C_5a”, “ST1_1” e “ST1_2”; 2) ST1+HE1+SA1+HE2+HE4: sucesso nos nós “A_C_5a”, “ST1_1” e “ST1_2” ou sucesso nos nós “SA1_1”, “SA1_2”, “ST1_1” e “ST1_2”; 3) ST1+CO1: sucesso nos nós “CO1”, “ST1_1” e “ST1_2”, ou; 4) CC1: sucesso nos nós “CC1_1” e

“CC1_2”. Além disto, em caso de falha dos equipamentos envolvidos na atividade 5 (e.g., ST1), foi considerado que o sucesso na atividade 11, representada pelo nó “Atividade11A”, resultará na recuperação destas falhas – considera-se que as atividades de manutenção serão realizadas com êxito (estas atividades não são modeladas neste trabalho).

Para a atividade 8, representada pelo nó “Atividade8”, foi considerado o sucesso quando houver o sucesso nas ações humanas e equipamentos envolvidos, para cada combinação de agentes – estados do nó “CICLO_3”, na RB da Fig. 62 –, da seguinte forma: 1) ST1+HE1+HE3+HE4: sucesso no nó “A_C_5b”; 2) ST1+HE1+SA1+HE2+HE4: sucesso no nó “A_C_5b_1”; 3) ST1+CO1: sucesso no nó “CO1”, ou; 4) CC1: sucesso nos nós “CC1_1” e “CC1_2”. Em caso de falha dos equipamentos envolvidos na atividade 8 (e.g., CC1), foi considerado que o sucesso na atividade 11, representada pelo nó “Atividade11A”, resultará na recuperação destas falhas. Ademais, foi considerado que o sucesso na atividade 8 é condicionado ao sucesso na atividade 5 – o fracasso na atividade 5 inviabiliza o sucesso na atividade 8.

Para as atividades 9 e 10, representadas pelos nós “Atividade9” e “Atividade10”, foi considerado o sucesso quando houver o sucesso nas ações humanas e equipamentos envolvidos, para cada combinação de agentes, da seguinte forma: 1) ST1+HE1+HE3+HE4: sucesso no nó “A_P_2”; 2) ST1+HE1+SA1+HE2+HE4: sucesso no nó “A_P_2”; 3) ST1+CO1: sucesso no nó “CO1”, ou; 4) CC1: sucesso nos nós “CC1_1” e “CC1_2”. Em caso de falha dos equipamentos envolvidos nas atividades 9 e 10 (e.g., CC1), foi considerado que o sucesso na atividade 11, representada pelo nó “Atividade11A”, resultará na recuperação destas falhas. Além disto, foi considerado que o sucesso nas atividades 9 e 10 é condicionado ao sucesso nas atividades 5 e 8 – i.e., o fracasso na atividade 5 ou o fracasso na atividade 8 inviabiliza o sucesso nas atividades 9 e 10.

De maneira geral, para as probabilidades de falha dos equipamentos considerados neste ciclo (nós em laranja na RB da Fig. 62), considerou-se o tempo de missão de 240 horas – o calor produzido pelo EC estocado na PEC será insignificante em 10 dias (vide o item 2.1). Especificamente para os sensores de vazão (nós “ST3_1” e “ST3_2”), foi considerado um tempo de missão de 80 horas – foi adotado o tempo de missão considerado para as bombas (vide o item 8.1.2.5.2).

Para as ações humanas (nós em amarelo na RB da Fig. 62), foram utilizados os dados de desempenho reproduzidos na Tab. 64, na coluna “Mediana” – na Etapa 9 (vide a subseção 8.1.3), será calculada a variabilidade da probabilidade de falha do SRPEC considerando as distribuições para as HEP destas ações (vide o Apêndice D).

Além das falhas nas atividades modeladas nos ciclos anteriores (vide o item 8.1.2.6), na elaboração do nó “SRPEC” da RB na Fig. 62, considerou-se que a falha nas atividades 5, 8, ou 10 pode levar à falta de resfriamento de um dos compartimentos do SRPEC. Considerou-se que a falha na atividade 9 não leva diretamente à falta de resfriamento – não foi adicionado um arco entre os nós “Atividade9” e “SRPEC”.

Dentre as combinações de equipamentos representadas no nó “CICLO_3”, a maior confiabilidade refere-se ao estado “CC1” – esta conclusão foi obtida considerando a evidência de falha do SRPEC (com a evidência do estado “P1_BC1_TC1_CN1_VA1” no nó “CICLO_2”). O estado “CC1” refere-se à combinação na quarta linha da Tab. 94. Se for considerada a evidência deste estado na RB da Fig. 62, a probabilidade de sucesso do SRPEC será igual a $9,96E-01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento igual a $3,64E-03$ e a probabilidade de outras falhas igual a $4,15E-04$. Verifica-se que esta solução não atende ao critério de confiabilidade para o SRPEC (probabilidade de falha menor que $1,00E-03$; vide o item 8.1.1.2). Ressalte-se que os resultados reproduzidos na Fig. 62 referem-se à RB somente com a evidência do estado “P1_BC1_TC1_CN1_VA1” para o nó “CICLO_2”.

Ainda na RB da Fig. 62, considerando o estado “CC1” para o nó “CICLO_3” e a evidência de falha de resfriamento, verifica-se que os nós que mais contribuem para a probabilidade de falha são o “A_C_5a_1” e o “A_C_4a”, relativos à atividade 11. Empregando-se os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 64 para estas ações – o Capítulo 7 (vide o último parágrafo do item 7.1.3.4.3) apresenta uma discussão sobre as implicações desta alteração –, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em $9,98E-01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em $1,99E-03$ e a probabilidade de outras falhas calculada em $1,95E-04$. Este resultado não atende ao critério de confiabilidade para o SRPEC. O próximo ciclo propõe a melhora na execução da atividade 11.

Fig. 62 – RB para o SRPEC (ciclo 3)

8.1.2.8 Desenvolvimento de soluções – ciclo 4

Neste quarto ciclo (ciclo 4) foram definidas redundâncias para os agentes da atividade 11 – vide a Tab. 95.

8.1.2.8.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 4)

Em relação ao ciclo 3, à atividade 11 foram acrescentadas ações redundantes e independentes em relação às incluídas no item 8.1.2.7.1, na forma discriminada na Tab. 97 (foram incluídas as ações hachuradas). A Tab. 97 apresenta a correlação entre as ações incluídas e as ações do modelo prospectivo de desempenho humano – esta correlação foi feita da forma descrita no item 8.1.2.7.1.

Tab. 97 – Possíveis ações humanas no ciclo 4: ações do modelo prospectivo

<i>Ações Humanas</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
HE5 (OP1)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
HE5_1 (OP2)	Cognitivo	Avaliar	Verificar	A_C_5a	Regra
HE6 (OP1)	Cognitivo	Analisar	Diferenciar	A_C_4a	Conhecimento
HE6_1 (OP2)	Cognitivo	Analisar	Diferenciar	A_C_4a	Conhecimento

Nota-se na Tab. 97 que as ações semelhantes devem ser executadas por operadores diferentes. Especificamente para as ações HE5 e HE5_1, está sendo considerada a disponibilização de um par de sensores de temperatura para cada operador – para as ações HE6 e HE6_1, os operadores compartilham o mesmo par de sensores de vazão (um para cada circuito monitorado).

8.1.2.8.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 4)

Esta etapa não foi realizada neste ciclo – na etapa 6 (item anterior) não foram associadas duas ou mais opções a serem comparadas.

8.1.2.8.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 4)

A RB da Fig. 62 foi revista para considerar as alterações apresentadas no item 8.1.2.8.1, sendo obtida a RB apresentada na Fig. 63. Nesta rede, os nós em marrom referem-se às ações acrescentadas no ciclo 4 (item 8.1.2.8.1) – os demais

nós já foram apresentados na descrição da RB da Fig. 62. As TPC para os nós desta rede estão apresentadas no Apêndice K – onde são indicadas as alterações em relação à RB da Fig. 62. As HEP associadas aos nós para as ações acrescentadas neste ciclo (“A_C_4a_1” e “A_C_5a_2”) foram obtidas da Tab. 64, da coluna “Mediana”. As probabilidades para os nós relacionados a equipamentos (“ST1_5” e “ST1_6”) foram obtidas da mesma forma que as probabilidades para os nós semelhantes na rede da Fig. 62 (e.g., “ST1_1”).

Conforme a RB da Fig. 63, considerando o estado “CC1” para o nó “CICLO_3”, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em 9,99E-01 – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em 1,14E-03 e a probabilidade de outras falhas calculada em 1,58E-04. Empregando-se os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 64 para as ações humanas relacionadas à atividade 11, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em 9,99E-01 – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em 1,00E-04 e a probabilidade de outras falhas calculada em 1,57E-04. Este resultado atende ao critério de confiabilidade para o SRPEC (probabilidade de falha no resfriamento menor que 1.00E-03; vide o item 8.1.1.2).

8.1.2.9 Desenvolvimento de soluções – ciclo 5

Neste ciclo (ciclo 5) foram propostos os agentes para as atividades 2, 3, 4, 15 e 16 da sequência apresentada na Fig. 56 – a avaliação de confiabilidade foi realizada com base na RB na Fig. 64.

8.1.2.9.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 5)

Os sistemas que fazem interface com o SRPEC e que devem ser alinhados antes do início da operação são o SE e o SARS. Na sequência de ações proposta da Fig. 56, este alinhamento é feito na atividade 2. O alinhamento do SE é realizado via painel P1, permitindo a alimentação elétrica de bombas e sistema de controle de temperatura (e.g., CC1). O alinhamento do SARS é feito pela abertura das válvulas V5, V6, V7, V8, V9 e V10 (vide Fig. 60) e fechamento das válvulas V17, V18 e V19 – sendo alinhados os circuitos 1 e 2, e desabilitado o circuito 3. Consideram-se, assim,

duas ações humanas para a execução da atividade 2, correlacionadas às ações do modelo prospectivo de desempenho humano conforme a Tab. 98.

Fig. 63 – RB para o SRPEC (ciclo 4)

Tab. 98 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 2

<i>Ação</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
Alinhar o SE	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
Alinhar o SARS	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade

Considera-se que a atividade 3 pode ser concluída pela execução adequada de três ações com procedimentos operacionais bem definidos (vide a Fig. 60): a) Alinhamento das bombas B1 e B2, localmente e via P1; b) Alinhamento do P1 e dos controladores de temperatura (CC1; vide o item 8.1.2.7.1) para o resfriamento do PEC-I e do PEC-II; e c) Alinhamento das válvulas manuais do SRPEC: abertura das válvulas V1 e V3, e fechamento das válvulas V2, V4, V11, V12, V13, V14, V15, e V16. Estas ações foram correlacionadas às ações do modelo prospectivo de desempenho humano conforme a Tab. 99.

Tab. 99 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 3

<i>Ação</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
Alinhar as bombas	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
Alinhar os controladores	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
Alinhar as válvulas	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade

Os testes pré-operacionais visam à garantia de que, antes da introdução do EC na PEC, o SRPEC esteja em pleno funcionamento, i.e., com todas as funções e equipamentos disponíveis e operacionais. Estes testes definem se o EC pode ser enviado à PEC ou se o SRPEC deve sofrer correções antes disto – caso sejam observadas anomalias decorrentes do período de espera entre o último procedimento de manutenção e a necessidade de operar o SRPEC. Sendo assim, as seis ações a seguir foram associadas à atividade 4 (vide a Fig. 60): a) Aferir os sensores de temperatura – utilizados nas atividades 4 e/ou 11A para a identificação de anomalias; b) Aferir os sensores de vazão – utilizados nas atividades 4 e 11B na identificação de anomalias; c) Testes no sistema de controle – inclui o painel P1; d) Verificar o funcionamento das bombas B1, B2 e B3; e) Verificar o encaminhamento do fluido quanto a vazamentos e obstruções – i.e., válvulas, trocadores de calor, tubos e conexões, e; f) Acompanhar o funcionamento do sistema após os testes e alinhamento. Estas ações foram correlacionadas às ações do modelo prospectivo de desempenho humano conforme a Tab. 100.

Tab. 100 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 4

<i>Ação</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
A: Aferir os sensores de temperatura	Cognitivo	Entender	Comparar	A_C_2f	Conhecimento
B: Aferir os sensores de vazão	Cognitivo	Entender	Comparar	A_C_2f	Conhecimento
C: Testes dos sistemas de controle	Cognitivo	Analisar	Diferenciar	A_C_4a	Conhecimento
D: Testes das bombas	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
E: Verificação do encaminhamento do fluido	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
F: Acompanhar o comportamento do sistema	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A_C_5b	Conhecimento

A atividade 15 refere-se ao realinhamento dos sistemas de interface, caso seja observada uma anomalia no SRPEC – na atividade 11. Considera-se que o SE foi adequadamente alinhado na atividade 2. Sendo assim, esta atividade refere-se ao realinhamento do SARS pela abertura das válvulas V17, V18 e V19 e fechamento das válvulas V8, V9 e V10 ou das válvulas V5, V6 e V7 (vide a Fig. 60) – dependendo do circuito que falhar, sendo alinhado o circuito 3. Considera-se, assim, uma ação humana para a execução da atividade 15, correlacionada à ação do modelo prospectivo de desempenho humano conforme a Tab. 101.

Tab. 101 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 15

<i>Ação</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
Realinhar o SARS	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade

Considera-se que a atividade 16 pode ser concluída com êxito pela execução adequada de três ações – com procedimentos operacionais bem definidos –, em função do circuito que falhar (vide a Fig. 60): a) Alinhamento da bomba B3 e desativação da bomba B1 ou da bomba B2, localmente e via P1; b) Realinhamento do P1 e do controlador de temperatura referente ao circuito 3 (CC1; vide o item 8.1.2.7.1) para o resfriamento do PEC-I ou do PEC-II, e desativação do controlador referente ao circuito defeituoso, e; c) Realinhamento das válvulas manuais do SRPEC: abertura das válvulas V11 e V14, ou das válvulas V12 e V15, e fechamento das válvulas V1 e V3 – caso a falha ocorra no circuito 2. Estas ações foram correlacionadas às ações do modelo prospectivo na Tab. 102.

Tab. 102 – Correlações entre as ações do modelo e as da atividade 16

<i>Ação</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
Realinhar bombas	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
Realinhar controladores	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade
Realinhar válvulas	Cognitivo	Aplicar	Executar	A_C_3a	Habilidade

Os dados de confiabilidade para as ações humanas consideradas neste ciclo (ciclo 5) foram apresentados na Tab. 103.

Tab. 103 – HEP para as ações apresentadas no ciclo 5

<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>	<i>Percentil 5%</i>	<i>Mediana</i>	<i>Percentil 95%</i>	<i>Média</i>
A_C_2f	Conhecimento	1,00E-02	6,00E-02	2,00E-01	7,02E-02
A_C_3a	Habilidade	1,00E-02	7,00E-02	3,00E-01	9,38E-02
A_C_4a	Conhecimento	6,00E-03	4,00E-02	1,00E-01	5,17E-02
A_C_5b	Conhecimento	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01

8.1.2.9.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 5)

Esta etapa não foi realizada neste ciclo porque não há mais que uma opção de agentes definidos para as atividades 2, 3, 4, 15 e 16 – vide o item 8.1.2.9.1.

8.1.2.9.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 5)

A RB da Fig. 63 foi revista para considerar as alterações apresentadas no item 8.1.2.9.1, sendo obtida a RB apresentada na Fig. 64. Os nós para as atividades 11 (“Atividade11A” e “Atividade11B”), 15 e 16, para os sensores utilizados na atividade 4 (e.g., ST1_3) e o nó “SRPEC” foram alterados, e os nós para as atividades 2, 3 e 4 foram acrescentados (em azul na Fig. 64). Também foram acrescentados os nós que representam a decomposição da atividade 4 (em azul) – e.g., “Atividade4A”, relativo à ação *A: Aferir os sensores de temperatura*, apresentada na primeira linha da Tab. 100 –, os nós que representam as ações humanas (em amarelo) e os nós que representam o estado dos equipamentos no momento dos testes pré-operacionais (em laranja) – apresentados à direita na Fig. 64. As TPC para esses nós foram reproduzidas no Apêndice L, sendo que as HEP para as ações humanas foram obtidas da Tab. 103, da coluna “Mediana”.

Os nós “Atividade15” e “Atividade16” foram alterados para considerar as dependências das ações apresentadas na Tab. 101 e na Tab. 102, respectivamente. Os nós “Atividade11A” e “Atividade11B” foram alterados para considerar as dependências da atividade 4 – respectivamente, das ações *A: Aferir os sensores de temperatura* (nó “Atividade4A”) e *B: Aferir os sensores de vazão* (nó “Atividade4B”), apresentadas na Tab. 100 –, sendo considerado que o erro na aferição dos sensores leva necessariamente à falha do sensor na atividade 11. O nó “SRPEC” foi alterado para correlacionar o estado do sistema com o desempenho das atividades 2, 3 e 4. No preenchimento da TPC deste nó, foi considerado que o fracasso na atividade 2 leva à falha no resfriamento, e que o fracasso na atividade 3 leva tanto à falha no resfriamento quanto à mistura de fluido e alteração no nível da água dos compartimentos da PEC. Entretanto, somente o erro na ação de alinhamento de válvulas leva à mistura de fluido e alteração de nível na atividade 3 – isto também é

válido para a atividade 16. O nó “Atividade4” apresenta estados correlatos aos estados do nó “SRPEC” – estas correlações foram observadas no preenchimento da TPC do nó “SRPEC”.

Para as atividades 2 e 3 (nós “Atividade2” e “Atividade3”), considerou-se que o sucesso será alcançado se a execução das ações listadas nas Tabs. 98 e 99, respectivamente, for bem-sucedida. Em caso de falha nestas ações, no entanto, também foi considerado o sucesso nas atividades 2 e 3 se a execução da ação *F: Acompanhar o comportamento do sistema* (parte da atividade 4, vide a Tab. 100) for bem-sucedida.

Para a atividade 4 (nó “Atividade4”), considerou-se que o sucesso será alcançado se a execução da ação *F: Acompanhar o comportamento do sistema* (nó “Atividade4F”) for bem-sucedida ou se a execução das ações *C: Testes dos sistemas de controle* (nó “Atividade4C”), *D: Testes das bombas* (nó “Atividade4D”) e *E: Verificação do encaminhamento do fluido* (nó “Atividade4E”) for bem-sucedida – estas ações foram listadas na Tab. 100. Se ocorrer o fracasso na ação *F: Acompanhar o comportamento do sistema*, e no caso de fracasso nas ações *C: Testes dos sistemas de controle* ou *D: Testes das bombas*, considerou-se a falha no resfriamento do SRPEC. No caso de fracasso na ação *E: Verificação do encaminhamento do fluido*, acompanhado de fracasso na ação *F: Acompanhar o comportamento do sistema*, consideraram-se tanto a mistura de fluido e a alteração no nível da água dos compartimentos da PEC quanto a falha no resfriamento.

Além de afetar o desempenho da atividade 11, as ações *A: Aferir os sensores de temperatura* (nó “Atividade4A”) e *B: Aferir os sensores de vazão* (nó “Atividade4B”), afetam as demais ações que compõem a atividade 4. Assim, o nó “Atividade4A” foi conectado ao nó “Atividade4C”, e o nó “Atividade4B” foi conectado aos nós “Atividade4D” e “Atividade4E”.

Especificamente às ações *C: Testes dos sistemas de controle*, *D: Testes das bombas*, e *E: Verificação do encaminhamento do fluido* – que compõem a atividade 4 –, além das ações humanas listadas na Tab. 100 (e dos sensores utilizados nestas ações), foram associados os estados dos equipamentos no momento dos testes pré-operacionais – que consideram o período de espera (i.e., o tempo transcorrido entre a última revisão do SRPEC, em que se considera o sistema *as good as new*, e os testes) e foram representados pelos nós iniciados por “Espera” (e.g., nó “EsperaBC1”). Na RB da Fig. 64, considerou-se que, caso os estados dos equipamentos sejam adequados (e.g., estado “Sucesso” para o nó “EsperaBC1”), o sucesso nestas ações independe do sucesso nas respectivas ações humanas – e.g., o estado “Sucesso” para o nó “Atividade4D” será observado se: 1) for observado o estado “Sucesso” tanto no nó “EsperaBC1” quanto no nó “EsperaP1”, ou; 2) em caso de falha nos nós do item anterior, as ações humanas forem bem-sucedidas (“Sucesso” nos nós “Atividade4B”, “ST3_1”, “ST3_2” e “A_C_3a_5”). Para estimar as probabilidades dos estados dos equipamentos no momento dos testes pré-operacionais, considerou-se que o período de espera seja de um ano. A probabilidade de falha de um equipamento – e de um ou mais equipamentos de determinado tipo, sendo consideradas falhas independentes – foi apresentada na Tab. 104. As taxas de falha foram obtidas da Tab. 91.

Tab. 104 – Probabilidade de falha entre a última revisão e os testes pré-operacionais

<i>Componente</i>	<i>Espera (horas)</i>	<i>Taxa média de falha (/10⁶ horas)</i>	<i>Probabilidade de falha</i>	<i>Quantidade testada</i>	<i>Probabilidade de falha de 1 ou mais</i>
BC1	8640	104	5,93E-01	3	9,33E-01
CC1	8640	24,68	1,92E-01	3	4,73E-01
CN1*	8640	0,57	8,48E-02	3	2,34E-01
P1	8640	1,75	1,50E-02	1	1,50E-02
TB1**	8640	1,52E-05/m	1,18E-05	3	3,55E-05
TC1	8640	31,1	2,36E-01	3	5,53E-01
VA1***	8640	0,152	1,31E-03	4; 6; 3X3	2,46E-02

()* Foram consideradas 18 conexões em cada circuito.

()** Foram consideradas uma ou mais falhas em 9 trechos de 10m de tubulação em cada circuito.

()*** São 4 válvulas no circuito 2, 6 no circuito 3, 3 em cada TC (pertencentes ao SARS).

Em virtude da baixa contribuição esperada da falha na demanda dos equipamentos considerados na Tab. 104 (relativamente aos resultados alcançados na última coluna), a probabilidade de falha na demanda não foi considerada neste ciclo – e.g., na Tab. 67, para bombas, esta probabilidade foi igualada a 6,25E-03. Especificamente para os sensores – relacionados aos nós “Atividade4A” e “Atividade4B” –, considerou-se que o erro na ação humana afeta significativamente

a calibragem. Desta forma, o sensor que estava em estado adequado antes da aferição pode, dado o erro nesta ação, encontrar-se inadequado após esta atividade. Desconsiderou-se, portanto, a dependência do desempenho destes sensores em relação ao período de inatividade, sendo que os nós “ST1_3”, “ST1_4”, “ST1_5”, “ST1_6”, “ST3_1” e “ST3_2” foram alterados para considerar a sua dependência em relação à aferição realizada na atividade 4 (vide a Tab. 100).

Conforme a RB da Fig. 64, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em $9,00E-01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em $1,00E-01$ e a probabilidade de outras falhas calculada em $5,84E-02$. Considerando a evidência de fracasso no resfriamento no nó “SRPEC” (tanto para no estado “Falha_resfriamento” quanto no estado “Falha_resfriamento_e_outras”), os nós “Atividade15”, “Atividade16” e os nós relacionados à atividade 4 apresentam as maiores probabilidades de fracasso – os nós “Atividade2”, “Atividade3” também são ressaltados, mas são dependentes de nós já citados –, conforme a Tab. 105. Empregando-se os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 103 para as ações humanas relacionadas a estes nós, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em $9,74E-01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em $2,63E-02$ e a probabilidade de outras falhas calculada em $1,56E-02$. Este resultado não atende ao critério de confiabilidade para o SRPEC (probabilidade de falha no resfriamento menor que $1.00E-03$; vide o item 8.1.1.2).

Tab. 105 – Probabilidade de “Fracasso” ou “Falha_resfriamento” na RB da Fig. 64

Nó	Sem evidência de falha do SRPEC	Com evidência “Falha_resfriamento”	Variação	Com evidência de “Falha_resfriamento_e_outras”	Variação
Atividade1	0,00E+00	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%
Atividade10	7,74E-04	1,74E-02	2149%	7,74E-04	0%
Atividade11A	6,57E-02	1,52E-01	131%	6,57E-02	0%
Atividade11B	6,11E-02	1,02E-01	66%	1,59E-01	160%
Atividade12	5,83E-03	0,00E+00	-100%	9,99E-02	1614%
Atividade13	5,57E-03	0,00E+00	-100%	9,55E-02	1614%
Atividade14	8,88E-03	7,45E-02	739%	9,87E-02	1012%
Atividade15	1,27E-01	1,95E-01	54%	2,18E-01	72%
Atividade16	2,45E-01	2,65E-01	8%	3,95E-01	61%
Atividade17	0,00E+00	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%
Atividade2	2,70E-02	4,72E-01	1648%	1,24E-01	359%
Atividade3	3,91E-02	0,00E+00	-100%	6,71E-01	1614%
Atividade4	2,67E-02	5,10E-01	1810%	2,89E-01	985%
Atividade5	7,74E-04	1,74E-02	2149%	7,74E-04	0%
Atividade6	1,35E-04	0,00E+00	-100%	2,32E-03	1614%
Atividade7	1,35E-04	0,00E+00	-100%	2,32E-03	1614%
Atividade8	7,74E-04	1,74E-02	2149%	7,74E-04	0%
Atividade9	7,74E-04	1,74E-02	2149%	7,74E-04	0%

8.1.2.10 Desenvolvimento de soluções – ciclo 6

Neste ciclo foram propostos agentes adicionais para melhorar o desempenho das atividades 4, 15 e 16.

8.1.2.10.1 Etapa 6 – Agrupamento dos agentes (ciclo 6)

Considerando os resultados apresentados no ciclo 5 (item 8.1.2.9.3), são propostas duas ações humanas adicionais, diretamente relacionadas ao alinhamento do SRPEC. A primeira ação refere-se à análise dos desvios do sistema antes da entrada do EC na PEC – trata-se, portanto, de uma ação baseada em referências (procedimentos escritos), redundante ao acompanhamento do comportamento do sistema exposto na Tab. 100 – compondo a atividade 4F. A segunda ação refere-se ao acompanhamento do comportamento do sistema após o seu realinhamento (nas ações associadas às atividades 15 e 16) – semelhante à proposta apresentada no ciclo 5 para as atividades 2 e 3. Estas ações foram correlacionadas ao modelo prospectivo de desempenho humano conforme a Tab. 106. Os dados de confiabilidade para estas ações foram reproduzidos na Tab. 107.

Tab. 106 – Correlações entre as ações do modelo e as ações do ciclo 6

<i>Atividade</i>	<i>Ação</i>	<i>Domínio</i>	<i>Categoria</i>	<i>Processo Cognitivo</i>	<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>
4F Acompanhar o comportamento do sistema	Análise das condições do sistema	Cognitivo	Analisar	Atribuir	A_C_4c	Conhecimento
15 e 16 Realinhar os Sistemas de Interface e Realinhar o SRPEC	Acompanhar o comportamento do sistema após o realinhamento	Cognitivo	Avaliar	Criticar	A_C_5b	Conhecimento

Tab. 107 – HEP para as ações apresentadas no ciclo 6

<i>Código</i>	<i>Nível de Desempenho</i>	<i>Percentil 5%</i>	<i>Mediana</i>	<i>Percentil 95%</i>	<i>Média</i>
A_C_4c	Conhecimento	2,00E-03	3,00E-02	2,00E-01	5,29E-02
A_C_5b	Conhecimento	7,00E-02	2,00E-01	4,00E-01	2,06E-01

8.1.2.10.2 Etapa 7 – Seleção da maior confiabilidade (ciclo 6)

Esta etapa não foi realizada neste ciclo porque não há opções a serem confrontadas – vide o item 8.1.2.10.1.

8.1.2.10.3 Etapa 8 – Confiabilidade do sistema (ciclo 6)

A RB da Fig. 64 foi revista para considerar as alterações apresentadas no item 8.1.2.10.1, sendo obtida a RB apresentada na Fig. 65. Os nós para as ações consideradas no item 8.1.2.10.1 foram acrescentados (em bege na Fig. 65), e os nós “Atividade4F”, “Atividade15” e “Atividade16” foram alterados para considerar as dependências destas ações. As TPC para estes nós foram reproduzidas no Apêndice M, sendo que as HEP para as ações humanas foram obtidas da Tab. 107, da coluna “Mediana”.

Para as atividades 15 e 16 (nós “Atividade15” e “Atividade16”), considerou-se que o sucesso será alcançado se a execução das ações listadas na Tab. 101 e na Tab. 102, respectivamente, for bem-sucedida. Em caso de falha nestas ações, no entanto, também foi considerado o sucesso nas atividades 15 e 16 se a execução da ação Acompanhar o comportamento do sistema após o realinhamento (vide a Tab. 106) for bem-sucedida.

Conforme a RB da Fig. 65, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em $9,98E-01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em $2,25E-03$ e a probabilidade de outras falhas calculada em $8,29E-04$. Empregando-se os dados de HEP da coluna “Percentil 5%” da Tab. 107 para as ações humanas adicionadas neste ciclo, a probabilidade de sucesso do SRPEC é calculada em $9,99E-01$ – sendo a probabilidade de falha no resfriamento calculada em $1,43E-03$ e a probabilidade de outras falhas calculada em $3,11E-04$. Este resultado é próximo do definido no critério de confiabilidade para o SRPEC (probabilidade de falha no resfriamento menor que $1.00E-03$; vide o item 8.1.1.2), sendo considerado satisfatório para o propósito deste trabalho.

Neste trabalho, não será proposta a alteração na solução obtida neste ciclo. Entretanto, considerando a evidência de falha no resfriamento (na RB da Fig. 65), verifica-se que os nós “Bombeamento_1”, “Bombeamento_2” e “Bombeamento_3” são os mais impactados na rede. Dentre estes, destaca-se o nó “Bombeamento_2”, indicando que a melhora dos resultados apresentados no parágrafo anterior pode ser obtida pela reconsideração do circuito 2 – e.g., redundância para a bomba B2 (vide a Fig. 60).

Fig. 65 – RB para o SRPEC (ciclo 6)

8.1.3 Etapa 9 – Descrição da solução para o sistema

De acordo com a solução apresentada na subseção 8.1.2 (ciclo 6), o SRPEC é composto por três circuitos independentes, com um controlador (conjunto CC1), um trocador de calor (tipo TC1), um sensor de vazão (ST3) e uma bomba (conjunto BC1) para cada circuito, sendo o fluxo da água direcionado por válvulas manuais – vide a Fig. 60. Os diferentes modos operacionais para este sistema estão apresentados na Tab. 108. Além do modo desligado – modo “O”, na Tab. 108 –, o esquema apresentado na Fig. 60 permite identificar outros 12 modos operacionais. Além dos modos para a operação normal, a Tab. 108 apresenta os modos equivalentes (resfriam os mesmos compartimentos) para a operação degradada – os modos degradados podem ser identificados pela mesma letra, mas acompanhada por um número (e.g., sendo “B” o modo em operação normal, o modo “B.1” é o possível modo degradado para resfriar o compartimento PEC-II).

As ações humanas previstas na operação deste sistema podem ser agrupadas entre as realizadas antes do depósito do EC na PEC (relativas às atividades 2, 3 e 4) ou entre as realizadas após a entrada do EC na PEC (relativas às atividades 11, 15 e 16). Considerando a precedência entre estas ações e impondo que as ações de verificação, análise e avaliação de ações humanas sejam realizadas por operadores diferentes dos executores, conclui-se que o SRPEC deve ser operado por pelo menos dois profissionais. A Tab. 109 apresenta uma possibilidade de atribuição (identificada por ●) de ações humanas a dois operadores (identificados por OP1 e OP2) – as ações humanas são identificadas pelos códigos utilizados na RB da Fig. 65 (e ao longo da subseção 8.1.2).

Tab. 108 – Modos operacionais para o SRPEC

<i>Modo Operacional</i>	<i>Compartimentos Resfriados</i>	<i>Descrição</i>
O	-	Desligado. Equipamentos inativos. Alinhamento para resfriar os compartimentos I & II.
A	PEC-I	Operação Normal. Circuito 1 resfria o compartimento I.
A.1		Operação Degradada. Circuito 3 resfria o compartimento I.
B	PEC-II	Operação Normal. Circuito 2 resfria o compartimento II.
B.1		Operação Degradada. Circuito 3 resfria o compartimento II.
C	PEC-III	Operação Normal. Circuito 2 resfria o compartimento III.
C.1		Operação Degradada. Circuito 3 resfria o compartimento III.
D	PEC-I & PEC-III	Operação Normal. Circuito 1 resfria o compartimento I. Circuito 2 resfria o compartimento III.
D.1		Operação Degradada. Circuito 1 resfria o compartimento I. Circuito 3 resfria o compartimento III.
D.2		Operação Degradada. Circuito 3 resfria o compartimento I. Circuito 2 resfria o compartimento III.
E	PEC-I & PEC-II	Operação Normal. Circuito 1 resfria o compartimento I. Circuito 2 resfria o compartimento II.
E.1		Operação Degradada. Circuito 1 resfria o compartimento I. Circuito 3 resfria o compartimento II.
E.2		Operação Degradada. Circuito 3 resfria o compartimento I. Circuito 2 resfria o compartimento II.

Na Tab. 109, foram discriminadas (hachuradas) as colunas referentes às ações que incluem a verificação de ações humanas realizadas por outro operador. Para as ações na fase pré-operacional, são verificadas as ações da mesma atividade e das atividades anteriores (e.g., o operador OP2, ao executar a ação A_C_5b_2, verifica as ações realizadas nas atividades 2 e 3 pelo OP1). Para as ações posteriores ao depósito do EC na PEC, são verificadas as ações da mesma atividade.

Tab. 109 – Atribuição das ações humanas no SRPEC a dois operadores

Anteriores ao depósito do EC na PEC	Atividade	4A	4B	2		3			4C	4D	4E	4F	
	Ação humana	A_C_2f (aferir)	A_C_2f_1 (aferir)	A_C_3a (alinhar)	A_C_3a_1 (alinhar)	A_C_3a_2 (alinhar)	A_C_3a_3 (alinhar)	A_C_3a_4 (alinhar)	A_C_4a_2 (analisar)	A_C_3a_5 (testar)	A_C_3a_6 (testar)	A_C_5b_2 (avaliar)	A_C_4c (analisar)
	OP1			•	•	•	•	•					•
	OP2	•	•						•	•	•	•	•

Posteriores ao depósito do EC na PEC	Atividade	11A		11B		15	16			15 e 16
	Ação humana	A_C_5a_1 (verificar)	A_C_5a_2 (verificar)	A_C_4a (analisar)	A_C_4a_1 (analisar)	A_C_3a_7 (alinhar)	A_C_3a_8 (alinhar)	A_C_3a_9 (alinhar)	A_C_3a_10 (alinhar)	A_C_5b_3 (avaliar)
	OP1	•			•	•	•	•	•	
	OP2		•	•						•

Considerando que a frequência de uso do SRPEC seja de 1/ano (vide o item 8.1.1.1), que os sistemas de interface não exerçam influência significativa sobre a operação do SRPEC (com exceção dos componentes indicados na Fig. 60), que os operadores estejam dedicados exclusivamente à operação do SRPEC e que os dados de confiabilidade para os componentes do SRPEC sejam os dados médios apresentados na Tab. 91 – i.e., sem considerar a incerteza destes dados –, as incertezas dos resultados apresentados nas etapas anteriores relacionam-se aos dados de confiabilidade do modelo prospectivo de desempenho humano adotado na Etapa 5 (vide o item 8.1.2.4). Estas incertezas foram representadas nas funções de probabilidades para as HEP das ações genéricas incluídas neste modelo. Estas funções podem ser utilizadas para estimar a variabilidade da probabilidade de falha no resfriamento do SRPEC.

Pela aplicação do MMC (ROBERT; CASELLA, 2004) na solução da RB apresentada na Fig. 65, foi obtida a variabilidade da probabilidade de falha no resfriamento do SRPEC. Isto foi feito para as seguintes condições: a) variando as HEP de todas as ações humanas da rede segundo as funções de probabilidades do modelo de desempenho (vide o Apêndice D); e b) variando as HEP somente das ações da rede relacionadas às atividades 2 e 3 (vide a Tab. 109) segundo as

funções de probabilidades do modelo de desempenho – de acordo com a avaliação apresentada no item 8.1.2.10.3, estas são as ações que não têm as HEP tomadas da coluna “Percentil 5%” das respectivas tabelas de dados (e.g., Tab. 107 para a ação A_C_4c). Os resultados estão apresentados nas Figs. 66 e 67, respectivamente para a condição “a” e para a condição “b” – para a obtenção destes dados, foi seguido o procedimento exposto no item 7.1.4. Nesta avaliação, considera-se que o emprego do percentil 5% para a probabilidade de erro em uma ação está associado à evidência de boas condições para a sua execução – e.g., operadores experientes, boas condições organizacionais.

Fig. 66 – Variabilidade para a P(falha no resfriamento), condição “a”

Assim, para a curva da Fig. 66, a mediana foi calculada em 7,36E-03, o percentil 5% foi calculado em 3,61E-03, e o percentil 95% foi calculado em 1,96E-02.

Fig. 67 – Variabilidade para a P(falha no resfriamento), condição “b”

E, para a curva da Fig. 67, a mediana foi calculada em $1,44E-03$, o percentil 5% foi calculado em $1,25E-03$, e o percentil 95% foi calculado em $1,64E-03$.

8.2 COMENTÁRIOS PARA O CAPÍTULO

De acordo com a proposta inicial desta tese, este capítulo apresentou a concepção do SRPEC – definindo de forma preliminar a configuração tanto do fator humano quanto dos equipamentos que podem compor este sistema –, pela aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3, subsidiada pelo modelo prospectivo de desempenho humano obtido por meio da TECHR. Assim como na aplicação anterior (Capítulo 7), a facilidade de priorização de pontos do projeto a serem melhorados, proporcionada pelo uso das RB, e a simplicidade de associação das ações humanas aos dados do modelo de desempenho, proporcionada pelo emprego da taxonomia de Bloom, podem ser destacados entre os aspectos positivos do emprego desta metodologia. Ademais, destacou-se como positiva a possibilidade de comparar no processo de concepção (com base em características de confiabilidade), alternativas de soluções compostas por equipamentos, por elementos humanos ou por ambos.

No processo de concepção, respeitando o escopo referido ao longo desta aplicação (e.g., não foram modeladas as atividades de manutenção) e as incertezas no modelo de desempenho humano (vide a subseção 8.1.3), foram feitas considerações que simplificaram a modelagem e agregaram conservadorismo aos modelos apresentados. Como exemplo, as seguintes considerações podem ser revistas – da forma indicada – para a redução deste conservadorismo:

- a) Um ano entre a revisão do SRPEC e o início da operação: este tempo pode ser revisto quando o planejamento de manutenção estiver disponível;
- b) Operação no modo operacional “E” (vide a Tab. 89): o conhecimento do perfil operacional da planta pode ser utilizado para definir a probabilidade de falha de cada modo operacional para compor a probabilidade de falha do sistema;
- c) Outros tipos de falha levam à falta de resfriamento: o detalhamento da gravidade de cada tipo de falha pode ser explorado para definir o seu

- impacto na capacidade de resfriamento;
- d) Os sistemas que fazem interface com o SRPEC não são considerados para a recuperação da falha do SRPEC: e.g., o SLP, em caso de perda de inventário, dependendo do volume, pode ser utilizado para reposição;
 - e) As probabilidades apresentadas na Tab. 91 consideram todos os modos de falha dos equipamentos: e.g., considerar apenas o modo de falha que leva ao vazamento para calcular a probabilidade de vazamento das válvulas, e/ou considerar apenas o modo de falha que leva à obstrução para calcular a probabilidade de obstrução das tubulações, e;
 - f) As ações humanas foram associadas às ações genéricas do modelo de desempenho obtido por meio da TECHR: em fases mais avançadas do projeto, o modelo de desempenho (Capítulo 6) pode ser alterado (para considerar os erros específicos que podem ocorrer nestas atividades) e/ou atualizado.

O número de iterações nas etapas cíclicas – e/ou de ciclos de desenvolvimento de soluções – da metodologia está relacionado às escolhas feitas durante a concepção (e.g., solucionar uma ou várias atividades em determinado ciclo) e não representa, necessariamente, uma medida de dificuldade na concepção. Na concepção do procedimento operacional, apresentado no Capítulo 7, foram realizadas duas iterações com dois ciclos cada. Neste capítulo, foi realizada apenas uma iteração com seis ciclos.

É interessante notar que na concepção do procedimento operacional do SRPEC foram listadas 40 ações humanas (vide o Capítulo 7), enquanto na concepção de todo o sistema foram listadas 21 ações – sendo 2 relacionadas a testes de equipamentos não considerados na primeira aplicação (vide a Tab. 100, em relação à verificação do encaminhamento do fluido e aos testes dos sistemas de controle). Além disto, no primeiro caso, o nível de desempenho mais representativo (de acordo com o total de ações humanas) é o nível de regra e, no segundo caso, o nível de habilidade é o mais representativo – a Tab. 110 explicita o número de ações em cada nível de desempenho. Com exceção de três atividades classificadas no domínio psicomotor – e relacionadas ao SRPEC na concepção do procedimento operacional (vide o Capítulo 7) – as ações humanas relacionadas em ambas as aplicações são classificadas no domínio cognitivo (da taxonomia de Bloom).

Tab. 110 – Atribuição das ações humanas no SRPEC a dois operadores

<i>Nível de desempenho</i>	<i>Quantidade de Atividades</i>	
	<i>Concepção do procedimento operacional (Capítulo 7)</i>	<i>Concepção de todo o sistema</i>
<i>Habilidade</i>	13	11
<i>Regra</i>	19	2
<i>Conhecimento</i>	8	8

Com base na Tab. 110 é possível concluir que na primeira aplicação da metodologia obteve-se um procedimento operacional mais complexo que o obtido nesta segunda aplicação, sendo necessárias mais ações humanas e mais regras para operar o SRPEC – no caso da primeira aplicação, as ações classificadas no domínio psicomotor referem-se ao acionamento do SRPEC, enquanto as ações desempenhadas no nível de regra referem-se à monitoração da temperatura e à recuperação de possíveis erros humanos. Além de que, nesta segunda aplicação foi concebido um sistema com 3 bombas, enquanto na primeira foi abordado um sistema com 4 bombas. Estas diferenças podem ser atribuídas às restrições observadas na primeira aplicação – e.g., impossibilidade de alterar a parte já concebida do sistema.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dados os requisitos de projeto, as informações sobre confiabilidade podem ser exploradas na escolha das partes que devem compor o sistema (equipamentos e operadores), numa comparação tanto das características de confiabilidade destes agentes, quanto da quantidade de recursos aplicados. Em uma abordagem comum, a confiabilidade é introduzida de forma quantitativa somente após a concepção do sistema, i.e., dado o sistema, estima-se a confiabilidade de seus componentes para compor sua confiabilidade e, assim, avaliar sua adequação aos requisitos de projeto. Esta abordagem traz desafios relevantes quando há necessidade de melhora da confiabilidade do sistema, por exemplo: 1) resistência dos tomadores de decisão em voltar à fase de concepção para introduzir as alterações necessárias (em especial devido aos custos envolvidos); 2) havendo o retorno à fase de concepção, indefinição dos projetistas sobre como atuar no sistema para aumentar a confiabilidade; e 3) no caso das ações do sistema executadas pelo elemento humano, consideração equivocada de que sua adaptabilidade pode resolver qualquer desvio.

Tendo em vista a atenuação destas limitações, esta tese propôs uma metodologia para a concepção de sistemas complexos que considera a confiabilidade quantitativamente ainda na fase de concepção, como instrumento para a tomada de decisão sobre os agentes que devem compor o sistema (tanto equipamentos quanto operadores). A pesquisa para o desenvolvimento desta metodologia evidenciou a necessidade de técnicas quantitativas para a consideração da confiabilidade humana nas fases iniciais de projeto. Desta forma, apresentou-se a TECHR, como técnica para o desenvolvimento de modelos prospectivos de desempenho humano atualizáveis – empregando RB para considerar dependências, combinar dados e realizar sua atualização bayesiana de forma expedita –, a serem explorados nesta metodologia.

Para avaliar a TECHR e a metodologia quanto à facilidade de aplicação em casos concretos e a utilidade dos seus resultados, foi desenvolvido um modelo prospectivo de desempenho humano aplicável à Etapa 5 da metodologia (Capítulos 5 e 6), e foram realizadas as aplicações apresentadas nos Capítulos 7 e 8 desta tese. Assim, foram observados os pontos favoráveis e as dificuldades comentados

ao final dos Capítulos 5, 6, 7 e 8. Retomando e ampliando estes comentários, ressaltaram-se os seguintes pontos favoráveis à aplicação tanto da metodologia quanto da técnica:

- **Metodologia para a concepção de sistemas complexos:** a) a metodologia auxilia na concepção de todo ou de parte do sistema, tendo em vista as restrições pré-estabelecidas para as suas características de confiabilidade – e.g., concepção do procedimento operacional de SRPEC (Capítulo 7), concepção do SRPEC (Capítulo 8); b) as aplicações demonstraram ser possível considerar a confiabilidade humana de forma simples e quantitativa ainda na fase de concepção, sem acrescentar dificuldades ao processo de projeto, permitindo comparar as soluções compostas por equipamentos, por elementos humanos ou por ambos. Assim, de forma mais abrangente, esta metodologia pode ser explorada na comparação das relações custo-benefício das alternativas de projeto (e.g. atimização da confiabilidade com base em um investimento fixo);
- **TECHR e modelo prospectivo de desempenho humano:** a) o modelo obtido pela TECHR, integrado por meio de RB, permite a exploração direta de recursos de atualização bayesiana, tanto na simulação durante a concepção quanto na atualização do modelo em fases mais adiantadas do projeto; b) o emprego da taxonomia de Reason para classificar os tipos de erro humano, em conjunto com a taxonomia de Bloom para classificar as ações humanas, permitiu o desenvolvimento de um modelo abrangente, estruturado e flexível, e que pode ser utilizado na fase de concepção de sistemas; c) o detalhamento das ações humanas com o emprego do modelo SRK e da taxonomia de Reason em conjunto com a taxonomia de Bloom tornou simples a associação das ações a serem executadas aos dados quantitativos de confiabilidade disponíveis no modelo, potencializando a integração dos trabalhos de engenharia de fatores humanos e de análise de confiabilidade humana – e.g., mesmo com informações incipientes sobre o contexto operacional, o emprego do modelo propiciou sugestões para a priorização de ações específicas (e bem caracterizadas) nas próximas etapas do projeto; d) o modelo pode ser explorado em diferentes contextos e permite análises de incerteza – os

seus resultados não são atrelados a um contexto específico de desempenho (foram calculados a partir de dados genéricos), e são apresentados em distribuições que carregam tanto as incertezas epistemológicas, quanto as inerentes ao desempenho humano; e) como alternativa à associação dos dados de desempenho das ações “mais semelhantes” (vide a seção 6.4), o modelo obtido pela aplicação da TECHR pode ser explorado para a definição da HEP de forma específica, ao considerar os tipos de erro que podem ocorrer na ação em análise (permitindo a estimativa a priori das HEP de ações não estudadas empiricamente).

De forma semelhante, em relação às dificuldades encontradas nas aplicações, ressaltaram-se:

- **Metodologia para a concepção de sistemas complexos:** o maior detalhamento dos modelos probabilísticos exige maior capacidade de processamento e, assim, para permitir a modelagem, pode ser necessário desenvolver modelos mais simples, e que exijam posições mais conservadoras – e.g., com maior detalhamento seria possível encontrar resultados menores para as probabilidades de falha consideradas para o SRPEC nos Capítulos 7 e 8;
- **TECHR: modelo prospectivo de desempenho humano:** a) a informação empregada no modelo foi extraída de técnicas de ACH, e não de dados “crus” de desempenho humano, o que dificultou a associação dos tipos de erro às ações de suas bases de dados; b) o detalhamento apresentado na literatura para os domínios psicomotor e afetivo da taxonomia de Bloom foi considerado insuficiente para permitir a associação dos tipos de erro às ações nestes domínios; c) a impossibilidade de gerar um processo exato e rápido de cálculo e atualização de HEP – necessário para o uso na fase de concepção – levou ao emprego de um método aproximado.

O emprego prático da metodologia e da técnica – apesar de não ser inviabilizado pelas dificuldades encontradas – pode ser melhorado. Além das sugestões de melhoria que podem ser derivadas das discussões apresentadas ao longo desta tese (em especial nos parágrafos anteriores) – e.g., refinamento dos modelos apresentados nas aplicações, pesquisa e desenvolvimento para o

detalhamento dos domínios psicomotor e afetivo da taxonomia de Bloom (e.g. correlacionar o domínio afetivo às ações humanas desempenhadas em situação de emergência), consideração de um número maior de especialistas para a associação dos tipos de erro às ações no modelo genérico, reduzindo a variabilidade em suas predições (as associações presentes nos Capítulos 5 e 6 restringiram-se às opiniões dos especialistas envolvidos neste trabalho) –, outra sugestão para trabalhos futuros é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o emprego da TECHR, que facilite a manipulação da informação e disponibilize diferentes formas de cálculo para o modelo prospectivo resultante (e.g. estudar alternativas para a recombinação de dados, reduzindo os desvios relatados na subseção 6.1.1).

Assim, embora não se baseie em conceitos novos, este trabalho discutiu a concepção de sistemas complexos considerando a confiabilidade humana, e desenvolveu a TECHR e uma metodologia para esta concepção, que representam aplicações concretas destes conceitos, de forma ordenada e viável. A metodologia proposta e a TECHR resultam em um procedimento simples e capaz de produzir modelos extremamente úteis na fase de concepção, representando uma contribuição original para o estado da arte da concepção de sistemas baseada em dados incertos.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, R. Putting Complex Systems to Work. **Complexity**, v. 13, n. 2, p. 30-49, 2007. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cplx.20200/abstract>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

ABO, E. E.; MAGED, A.; RAOUF, A. Manual backup operations: Some behavioral aspects of human reliability. **Microelectronics Reliability**, v. 19, n. 1, p. 141-149, 1979.

AICHE – AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Center for Chemical Process Safety – CCPS. **Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables**. New York: 1989.

ALVAREZ, R., et al. Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States. **Science and Global Security**, v. 11, n. 1, p. 1-51, 2003.

ANDERSON, L. W.; KRATHWOHL, D. R. **A taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives**. Nova York: Addison Wesley Longman, 2001.

ANNETT, J. Hierarchical Task Analysis. In: DIAPER, D.; STANTON, N. (Eds.). **The Handbook of Task Analysis for Human-Computer Interaction**. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2004

BARDSLEY, A. Defining and assessing safety functions performed by people. **Cognition, Technology & Work**, v. 15, n. 1, p. 13-18, 2013.

BAREITH, A.; HOLLO, E.; BORBELY, S.; SPURGIN, A. J. Treatment of human factors for safety improvements at the Paks Nuclear Power Plant. In: CACCIABUE, P. C.; PAPAZOGLU, I. A. (Ed.). **Probabilistic Safety Assessment & Management '96: ESREL '96 - PSAM-III**. Berlin: Springer-Verlag, 1996.

BARRIERE, M.; BLEY, D.; COOPER, S.; FORESTER, J.; KOLACZKOWSKI, A.; LUCKAS, W.; PARRY, G.; RAMEY-SMITH, A.; THOMPSON, C.; WHITEHEAD, D.; WREATHALL, J. **NUREG-1624: Technical Basis and Implementation Guideline for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)**. Washington D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2000.

BAZIUK, P. A.; RIVERA, S. S.; LEOD, J. N. M. Towards Human Factor Taxonomy with Cognitive Generic Terms. In: **Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 – WCE 2014**, v. II, London, U. K, July 2-4, 2014.

BELL, J.; HOLROYD, J. **Research Report RR679: Review of human reliability assessment methods**. Buxton, Derbyshire, UK: Health and Safety Executive – HSE, Health and Safety Laboratory – HSL, 2009.

BELL, J.; SWAIN, A. **NUREG/CR-2254**: A Procedure for Conducting a Human Reliability Analysis for Nuclear Power Plants. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, May, 1983.

BELLO, G. C.; COLOMBARI, V. Empirical technique to estimate operator's error (TESEO). **Reliability Engineering**, v. 1(3), p. 3-24, 1980.

BIEDER, C.; LE BOT, P.; CARA, F. What does a MERMOS analysis consist in?. In: **Proceedings of International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment – PSA'99**, Washington, D. C., USA, August 22-26, 1999.

BIEDER, C.; LE BOT, P.; DESMARES, E.; CARA, F.; BONNET, J.-L. MERMOS: EDF's new advanced HRA method. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Probabilistic Safety Analysis and Management – PSAM4**, 13-18 September 1998, New York, United States, 1998.

BLADH, K.; HOLMBERG, J. E.; PYY, P. An evaluation of the Enhanced Bayesian THERP method using simulator data. In: MARTORELL et al (Ed.). **Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Application**. London: Taylor and Francis Group, 2009.

BLIRANDO, C.; PESME, H. **HT-54/02/020/A**: Guide Application de la méthode MERMOS d'évaluation probabiliste de la fiabilité humaine pour les EPS de référence, Note technique. France: EDF, 2002.

BLOOM, B. S.; ENGELHART, M. D.; FURST, E. J.; HILL, W. H.; KRATHWOHL, D. R. **Taxonomy of educational objectives**: the classification of educational goals by a committee of college and university examiners. Handbook I: Cognitive domain. New York: David McKay Company, 1956.

BORING, R. L. Meeting Human Reliability Requirements through Human Factors Design, Testing, and Modeling. In: **Conference Proceedings of the European Safety and Reliability Conference – ESREL 2007**, Stavanger, Norway, 2007.

BORING, R. L. Fifty years of THERP and human reliability analysis. In: **Proceedings of the 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference – PSAM11 – and the Annual European Safety and Reliability Conference – ESREL 2012**. Helsinki, Finland: 2012.

BORING, R. L.; HENDRICKSON, S. M. L.; FORESTER, J. A.; TRAN, T. Q.; LOIS, E. **SAND2008-2619**: Issues in Benchmarking Human Reliability Analysis Methods: A Literature Review. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, April 2008

BORING, R. L.; JOE, J. C. Task Decomposition in Human Reliability Analysis. In: **Proceedings of Probabilistic Safety Assessment and Management – PSAM 12**. Honolulu, Hawaii: June, 2014.

BROUGHTON, J.; CARTER, R.; CHANDLER, F.; HOLCOMB, G.; HUMENIUK, B.; KERIOS, B.; BRUCE, P.; SNYDER, P.; STRICKLAND, S.; VALENTINO, B.; WALLACE, L.; WALLACE, T.; ZEITERS, D. **PGOC91-F050-JMS-99286**: Human Factors Process Failure Modes & Effects Analysis. Boeing, 1999.

BUBB, H. System ergonomics as an approach to improve human reliability. **Nuclear Engineering and Design**, v. 110, n. 2, p. 233-245, 1988.

BYE, A.; LOIS, E.; DANG, V. N.; PARRY, G.; FORESTER, J. A.; MASSAIU, S.; BORING, R. L.; BRAARUD, P. Ø.; BROBERG, H.; JULIUS, J.; MÄNNISTÖ, I.; NELSON, P. **NUREG/IA-0216, V. 2**: International HRA Empirical Study – Phase 2 Report: Results from Comparing HRA Method Predictions to HAMMLAB Simulator Data on SGTR Scenarios. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2011.

CACCIABUE, P. Dynamic reliability and human factors for safety assessment of technological systems: a modern science rooted in the origin of mankind. **Cognition, Technology & Work**, v. 12, n. 2, p. 119-131, 2010.

CACCIABUE, P. C.; DECORTIS, F.; DROZDOWICZ, B.; MASSON, M.; NORDVIKH, J. P. **Nuclear Science and Technology**: COSIMO: A Cognitive Simulation Model of Human Decision Making and Behavior in Complex Work Environments. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1992.

CARA, F.; BIEDER, C.; LE BOT, P. What are the CICAs? Retrospective analysis of the Three Mile Island accident from the MERMOS viewpoint. In: **Proceedings of International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment – PSA'99**, Washington, D. C., USA, August 22-26, 1999.

CARNINO, A. Human Reliability. **Nuclear Engineering and Design**, v. 90, n. 3, p. 365-369, 1985.

CHANDLER, F. T.; CHANG, Y. H.; MOSLEH, A.; MARBLE, J. L.; BORING, R. L.; GERTMAN, D. I. **Human Reliability Analysis Methods: Selection Guidance for NASA**. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration – NASA, July, 2006.

CHANG, Y. J.; BLEY, D.; CRISCIONE, L.; KIRWAN, B.; MOSLEH, A.; MADARY, T.; NOWELL, R.; RICHARDS, R.; ROTH, E. M.; SIEBEN, S.; ZOULIS, A. The SACADA database for human reliability and human performance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 125, p. 117–133, May, 2014.

CHARNIAK, E. Bayesian Network without Tears. **IA Magazine**, USA, 1991.

CHEOK, M. C. **Preliminary Risk Analysis of Spent Fuel Pool Accidents at Decommissioning Plants**. Washington, D. C.: United States Nuclear Regulatory Commission, 1999. Disponível em: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0110/ML011070127.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2015.

CHIEN, S. H.; DYKES, A. A.; STETKAR, J. W.; BLEY, D. C. Quantification of Human Error Rates Using a SLIM-Based Approach. In: **Proceedings of IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants**, Monterey, CA, June 5–9, 1988.

CHURCHES, A. **Bloom's Digital Taxonomy**. 2009. Disponível em: <<http://edorigami.wikispaces.com/Bloom's+Digital+Taxonomy>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

COLLINS, T. E.; HUBBARD G. **NUREG-1738**: Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants. Washington, D. C.: United States Nuclear Regulatory Commission, 2001.

COOPER, S. E.; RAMEY-SMITH, A. M.; WREATHALL, J.; PARRY, G. W.; BLEY, D. C.; LUCKAS, W. J.; TAYLOR, J. H.; BARRIERE, M. T. **NUREG/CR-6350**: A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA) – Technical Basis and Methodological Description. Upton, N. Y.: Brookhaven National Laboratory, U. S. Nuclear Regulatory Commission, April, 1996.

COUTURE, M. **Complexity and chaos – State-of-the-art: Overview of theoretical concepts**. TM 2006-453, Québec, CA: Defence Research and Development – DRDC Valcartier, August, 2007.

CZAJA, S. J.; Nair, S. N. Human factors engineering and systems design. In: SALVENDY, G. **Handbook of Human Factors and Ergonomics**. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. p. 38-56.

DANG, V. N.; REER, B.; HIRSCHBERG, S. Analyzing Errors of Commission: Identification and First Assessment for a Swiss Plant. In: NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA. **NEA/CSNI/R(2002)3**: Proceedings of the International Workshop “Building the new HRA: Errors of Commission from research to application”. France: Committee on the Safety of Nuclear Installations – CSNI, 2003.

DANG, V. N.; FORESTER, J.; BORING, R.; BROBERG, H.; MASSAIU, S.; JULIUS, J.; MÄNNISTÖ, I.; NELSON, P.; LOIS, E.; BYE, A. **NUREG/IA-0216, V. 3**: International HRA Empirical Study – Phase 3 Report: Results from Comparing HRA Method Predictions to Simulator Data on LOFW Scenarios. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2014.

DAVE, R. H. Psychomotor Levels. In: ARMSTRONG, R. J. (Ed.). **Developing and Writing Behavioral Objectives**. Tucson: Educational Innovators Press, 1970.

DEKKER, S. W. A. **Ten questions about human error, a new view of human factors and system safety**. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 2005.

DE LA GARZA, C.; LABARTHE, J. P.; GRAGLIA, L. The contribution of ergonomics to risk analysis in the design process: the case of a future control room. **Work: A Journal of Prevention Assessment and Rehabilitation**, v. 41, n. 1, p. 730-736, 2012.

DESMARES, E.; CARA, F. **HT-54/98/007/B**: MERMOS: justifications théoriques. France: EDF, 2000.

DET NORSKE VERITAS – DNV. **OREDA – Offshore Reliability Data Handbook – Volume 1: Topsides Equipment**. 5th ed. Norway: 2009.

DOUGHERTY, E.; FRAGOLA J. **Human Reliability Analysis: A Systems Engineering Approach with Nuclear Power Plant Applications**. Canada: John Wiley & Sons Ltd, 1987.

DOUGHERTY, E. M.; FRAGOLA, J. R. Foundations for a time reliability correlation system to quantify human reliability. In: **Conference Record for 1988 IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants**, 1988.

EFRON, B. Bayesians, frequentists, and scientists. **Journal of the American Statistical Association**, v. 100, n. 469, p. 1-5, 2005.

EMBREY, D. E.; Humphreys, P. C.; Rosa, E. A.; Kirwan, B.; Rea K. **NUREG/CR-3518: SLIM-MAUD: An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Expert Judgment**. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1984.

ENERGY INSTITUTE. **Guidance on quantified human reliability analysis (QHRA)**. London: Energy Institute, November, 2012.

EZELL, B. C.; BENNETT, S. P.; WINTERFELDT, D. V.; SOKOLOWSKI, J.; COLLINS, A. J. Probabilistic risk analysis and terrorism risk. **Risk Analysis**, v. 30, i. 4, p. 575-589, 2010.

FARDINPOUR, A.; REINERS, T. The Taxonomy of Goal-oriented Actions in Virtual Training Environments, **Procedia Technology**, v. 13, pp.38-46, 2014.

FERRAZ, A. P. C. M.; BELHOT, R. V. Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 2, p. 421-431, 2010.

FILGUEIRAS, L. V. L. Human performance reliability in the design-for-usability life cycle for safety human-computer interfaces. In: FELICI, M.; KANOUN, K.; PASQUINI, A. (Org.). **Lecture Notes in Computer Science: Computer safety, reliability and security**. 1ed. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

FORESTER, J.; BLEY, D.; COOPER, S.; LOIS, E.; SIU, N.; KOLACZKOWSKI, A.; WREATHALL, J. Expert elicitation approach for performing ATHEANA quantification. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 83, p. 207-220, 2004.

FORESTER, J.; KOLACZKOWSKI, A.; COOPER, S.; BLEY, D.; LOIS, E. **NUREG-1880: ATHEANA User's Guide: Final Report**. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2008.

FORESTER, J.; KOLACZKOWSKI, A.; LOIS E.; KELLY, D. **NUREG-1842: Evaluation of Human Reliability Analysis Methods against Good Practices**. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2006.

FORESTER, J. A.; COOPER, S. E.; KOLACZKOWSKI, A. M.; BLEY, D. C.; WREATHALL, J.; LOIS, E. **SAND2008-5085: An Overview of the Evolution of Human Reliability Analysis in the Context of Probabilistic Risk**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, January, 2009.

FORESTER, J. A.; DANG, V. N.; BYE, A.; BORING, R. L.; LIAO, H.; LOIS, E. Conclusions on Human Reliability Analysis (HRA) Methods from the International HRA Empirical Study. In: **Proceedings of the 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference – PSAM11 – and the Annual European Safety and Reliability Conference – ESREL 2012**. Helsinki, Finland: 2012.

FRENCH, S.; BEDFORD, T.; POLLARD, S. J. T.; SOANE, E. Human Reliability Analysis: a critique and review for managers. **Safety Science**, v. 49, i. 6, p. 753-763, July, 2011.

GERTMAN, D. I.; BLACKMAN, H. S. **Human Reliability Analysis and Safety Analysis Data Handbook**. 2nd ed. New York: Johnwiley & Sons, 1994.

GERTMAN, D. I.; BLACKMAN, H. S.; MARBLE, J. L.; BYERS, J. C.; SMITH, C. L. **NUREG/CR-6883**: The SPAR-H Human Reliability Analysis Method. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2005.

GERTMAN, D. I.; BLACKMAN, H. S.; MARBLE, J. L.; SMITH, C.; BORING, R. L. The SPAR H Human Reliability Analysis Method. In: **Proceedings of Fourth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls and Human-Machine Interface Technologies – NPIC&HMIT 2004**, Columbus, Ohio. September, 2004b.

GERTMAN, D. I.; BLACKMANN, H. S.; HANEY, L. N.; SEIDLER, K. S.; HAHN, H. A. INTENT: A Method for Estimating Human Error Probabilities for Decision Based Errors. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 35, p. 127–136, 1992.

GERTMAN, D. I.; BORING, R. L.; MARBLE, J. L.; BLACKMAN, H. S. Mixed model usability evaluation of the SPAR-H human reliability analysis method. In: **Proceedings of Fourth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls and Human-Machine Interface Technologies – NPIC&HMIT 2004**, Columbus, Ohio. September, 2004a.

GIBSON, W. H.; KIRWAN, B. **CARA: A Human Reliability Assessment Technique for Air Traffic Management Safety Assurance**. 2007b. Disponível em: <www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/DOC_Conf_2007_007.html>. Acesso em: 01 jul. 2015.

GIBSON, W. H.; KIRWAN, B. **Application of the CARA HRA Tool to Air Traffic Management Safety Cases**. 2008. Disponível em: <http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/DOC_Conf_2008_002.html>. Acesso em: 01 jul. 2015

GORE, B. R.; DUKELOW, J. S. J.; MITTS, T. M.; NICHOLSON, W. L. **NUREG/CR-6355**: A Limited Assessment of the ASEP Human Reliability Analysis Procedure Using Simulator Examination Results. Washington DC: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1995.

GREENBERG, M.; HAAS, C.; COX JR., A.; LOWRIE, K.; MCCOMAS, K.; NORTH, W. Ten Most Important Accomplishments in Risk Analysis, 1980–2010. **Risk Analysis**, v. 32, n. 5, p. 771–781, 2012.

GREGORIADES, A.; SUTCLIFFE, A. Workload prediction for improved design and reliability of complex systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, n. 4, p. 530-549, 2008.

GRINSTEAD, C. M.; SNELL, J. L. **Introduction to Probability**. United States: American Mathematical Soc., 2012.

GSTALTER, H.; FASTENMEIER, W. Reliability of drivers in urban intersections. **Accident Analysis and Prevention**, v. 42, n. 1, p. 225-234, 2010.

HALL, R. E.; FRAGOLA, J. R.; WREATHALL, J. **NUREG/CR-3010**: Post event human decision errors: Operator action tree/time reliability correlation. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1982.

HANNAMAN, G. W. The role of frameworks, models, data, and judgment in human reliability analysis. **Nuclear Engineering and Design**, v. 93, n. 2, p. 295-301, 1986.

HANNAMAN, G. W.; SPURGIN, A. J. **EPRI NP-3583**: Systematic Human Action Reliability Procedure. Monterey, CA: Electric Power Research Institute, 1984.

HANNAMAN, G. W.; SPURGIN, A. J.; LUKIC, Y. D. A model for assessing human cognitive reliability in PRA studies. In: **Proceeding of the IEEE third Conference on Human Factors and Nuclear Safety**, Monterey, CA, 1985.

HARROW, A. J. **A taxonomy of the psychomotor domain**: A guide for developing behavioral objectives. New York: David McKay Co., 1972.

HAVLIKOVA, M.; JIRGL, M.; BRADAC, Z. Human Reliability in Man-Machine Systems. **Procedia Engineering**, v. 100, p. 1207 – 1214, 2015.

HAYNS, M. R. The Evolution of Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Industry. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers – Trans IChemE**, v. 77, Part B, p. 117-142, 1999.

HENDRICKSON, S. M. L.; PARRY, G. W.; FORESTER, J. A.; DANG, V. N.; WHALEY, A. M.; LEWIS, S.; LOIS, E.; XING, J. Towards an Improved HRA Method. In: **Proceedings of the 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference – PSAM11 – and the Annual European Safety and Reliability Conference – ESREL 2012**. Helsinki, Finland: 2012.

HICKLING, E.; BOWIE, J. Applicability of human reliability assessment methods to human-computer interfaces. **Cognition, technology & work**, v. 15, n. 1, p. 19-27, 2013.

HIRSCHBERG, S. **Dependencies, Human Interactions and Uncertainties in Probabilistic Safety Assessment**: Final Report of the NKA Project RAS 470. Västerås: ABB Atom AB, 1990.

HOLLNAGEL, E. **Human reliability analysis: Context and control**. London: Academic Press, 1993.

HOLLNAGEL, E. **Cognitive reliability and error analysis method: CREAM**. 1st ed. Oxford: Elsevier Science, 1998.

HOLLNAGEL, E. Human Reliability Assessment in Context. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 37, n. 2, p. 159-166, 2005.

HOLMBERG, J.; PYY, P. An Expert Judgement Based Method for Human Reliability Analysis of Forsmark I and II Probabilistic Safety Assessment. In: KONDO, S.; FURUTA, K. (Ed.). **Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Analysis and Management (PSAM5)**, Vol. 2/4. Tokyo: Universal Academy Press, 2000.

HUNNS, D.; DANIELS, B. K. The Methods of paired comparison and the results of the paired comparisons consensus exercise. In: **Proceedings of the 6th Advances in Reliability Technology Symposium**, NCSR R23, Culcheth, U. K., 1980.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA-TECDOC-1106**: Living Probabilistic Safety Assessment (LPSA). Vienna, Austria: IAEA, 1999.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA-TECDOC-1200**: Applications of Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Nuclear Power Plants. Vienna, Austria: IAEA, 2001.

IMO – INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process**. MSC-MEPC.2/Circ.12. London: International Maritime Organization, 2013.

INGEMARSON, I. Requirements on Databases and Input Data to PSA (PSAM-0074). In: **Proceedings of 8th International Conference on Probabilistic Safety Assessment & Management – PSAM**. New York: ASME Press, 2006.

ISAAC, A.; SHORROCK, S. T.; KENNEDY, R.; KIRWAN, B.; ANDERSEN, H.; BOVE, T. **HRS/HSP-002-REP-01**: Technical Review of Human Performance Models and Taxonomies of Human Error in ATM (HERA). Brussels: European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2002

JOICE, P.; HANNA, G. B.; CUSCHIERI, A. Errors enacted during endoscopic surgery — a human reliability analysis. **Applied Ergonomics**, v. 29, n. 6, p. 409-414, 1998.

JULIUS, J.; GROBBELAAR, J.; SPIEGEL, D.; RAHN, F. **The EPRI HRA Calculator® User's Manual, Version 3.0**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, May, 2005.

JUNG, W. **A Standard HRA Method for PSA in Nuclear Power Plant: K-HRA Method**, KAERI/TR-2961/2005, 2005.

KADANE, J. B. **Principles of Uncertainty**. Boca Raton: CRC Press, 2011.

KAUFFMAN S. **At Home in the Universe**: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity. New York: Oxford University Press, 1995.

KENNEDY, G. A. L.; SIEMIENIUCH, C. E.; SINCLAIR, M. A.; KIRWAN, B. A.; GIBSON, W. H. Proposal for a sustainable framework process for the generation, validation, and application of human reliability assessment within the engineering design lifecycle. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 92, n. 6, p. 755-770, 2007.

KENNEDY, R.; KIRWAN, B.; SUMMERSGILL, R. Making HRA a more consistent science. In: COTTAM, M.; PAPE, R. P.; HARVEY, D. W.; TAIT, J. (Ed). **Foresight & Precaution**. Balkema, Rotterdam: 2000.

KIERAS, D. E. Model-based evaluation. In: JACKO, J. A.; SEARS, A. (Eds). **The human-computer interaction handbook**. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, pp. 1139-1151, 2003.

KIM, I. S. Human reliability analysis in the man-machine interface design review. **Annals of Nuclear Energy**, v. 28, n. 11, p. 1069-1081, 2001.

KIRWAN, B. Human reliability analysis of an offshore emergency blow down system. **Applied Ergonomics**, v. 18, n. 1, p. 23-33, 1987.

KIRWAN, B. A comparative evaluation of five human reliability assessment techniques. In: SAYERS, B. A. (Ed.). **Human Factors and Decision Making**. London: Elsevier, p. 87-109, 1988.

KIRWAN, B. A resources flexible approach to human reliability assessment for PRA. In: **Safety and Reliability Symposium**, London: Elsevier Applied Sciences, 1990.

KIRWAN, B. **A Guide to Practical Human Reliability Assessment**. London: Taylor & Francis, 1994.

KIRWAN, B. The validation of three human reliability quantification techniques, THERP, HEART and JHEDI: Part 1 technique descriptions and validation issues. **Applied ergonomics**, v. 27 (6), p. 359-373, 1996.

KIRWAN, B. The development of a nuclear chemical plant human reliability management approach: HRMS and JHEDI. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 56, n. 2, p. 107-133, 1997a.

KIRWAN, B. The validation of three human reliability quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI: Part III – Practical aspects of the usage of the techniques. **Applied Ergonomics**, v. 28 (1), p. 27-39, 1997b.

KIRWAN, B. Human error identification techniques for risk assessment of high risk systems – Part 1: Review and evaluation of techniques. **Applied Ergonomics**, v. 29, n. 3, p. 157-177, 1998.

KIRWAN, B. **Technical Basis for a Human Reliability Assessment: Capability for Air Traffic Safety Management**, EEC Note No. 06/07. Brussels: European Organisation for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL Experimental Centre, September, 2007.

KIRWAN, B.; AINSWORTH, L. K. **A Guide to Task Analysis**. London: Taylor & Francis, 1992.

KIRWAN, B.; GIBSON, H. CARA: A Human Reliability Assessment Tool for Air Traffic Safety Management – Technical Basis and Preliminary Architecture. In: REDMILL, F.; ANDERSON, T. (Ed). **The Safety of Systems**: Proceedings of the Fifteenth Safety-critical Systems Symposium, Bristol, UK, 13–15 February, 2007. London: Springer, 2007a.

KIRWAN, B.; GIBSON, H.; KENNEDY, R.; EDMUNDS, J.; COOKSLEY, G.; UMBERS, I. Nuclear Action Reliability Assessment (NARA): A Data-Based HRA Tool. In: **Proceedings for the 7th Probabilistic Safety Assessment and Management**. Berlin, Germany: Springer, June 14-18, 2004.

KIRWAN, B.; GIBSON, H.; KENNEDY, R.; EDMUNDS, J.; COOKSLEY, G.; UMBERS, I. Nuclear Action Reliability Assessment (NARA): A Data-Based HRA Tool. **Safety and Reliability Journal**, v. 25 (2). Manchester: Safety and Reliability Society, 2005.

KIRWAN, B.; JAMES, N. J. A Human Reliability Management System. In: **Proceedings of Reliability '89**. Brighton, United Kingdom: June, 1989.

KIRWAN, B.; KENNEDY, R.; TAYLOR-ADAMS, S.; LAMBERT, B. The validation of three human reliability quantification techniques, THERP, HEART and JHEDI: Part II – results of validation exercise. **Applied ergonomics**, v. 28 (1), p. 17-25, 1997.

KOLACZKOWSKI, A.; FORESTER, J.; LOIS, E.; COOPER, S. **NUREG-1792**: Good Practices for Implementing Human Reliability Analysis. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2005.

KRATHWOHL, D. R. A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview. **Theory Into Practice**, v. 41, n. 4, p. 212–218, 2002.

KRATHWOHL, D. R.; BLOOM, B. S.; MASIA, B. B. **Taxonomy of educational objectives**: The classification of educational goals. Handbook II: the affective domain. New York: David McKay Co., 1969.

LAMARSH, J. R.; BARATTA, A. J. **Introduction to Nuclear Engineering**. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

LE BOT, P. Human reliability data, human error and accident models-illustration through the Three Mile Island accident analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 83, i. 2, p. 153-167, February 2004.

LE BOT, P.; BIEDER, C.; CARA, F. MERMOS, a second generation HRA method : what it does and doesn't do. In: **Proceedings of International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment – PSA'99**, Washington, D. C., USA, August 22-26, 1999.

LE BOT, P.; BIEDER, C.; VIDAL, S. Feedback from the actual implementation of the MERMOS method. In: **Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Analysis and Management – PSAM5**, Osaka, Japan, 27 November-1 December, 2000.

LE BOT, P.; DESMARES, E.; BIEDER, C.; CARA, F.; BONNET, J.-L. MERMOS: An EdF project to update the PHRA (Probabilistic Human Reliability Assessment) methodology. In: **OECD/Nuclear Energy Agency Specialists Meeting on Human Performance in Operational Events**, Chattanooga, USA, October 13-17, 1997.

LE BOT, P.; MEYER, P.; PESME, H. The CICA concept for use in the MERMOS method redefined by a new organizational reliability model. In: **Proceedings of IEEE 8th Human Factors and Power Plants (HFPP) and 13th Annual HPRCT Meeting**, Monterey, CA, USA, August 26-31, 2007.

LE BOT, P.; PESME, H.; RUIZ, F. Methodological Validation of MERMOS by 160 Analyses. In: **Proceedings of 2002 International Topical meeting on Probabilistic Safety Assessment – PSA '02**, October 2002, Detroit, Michigan, 2002.

LEE, J. S.; KIM, J.; JUNG, W.; A Human Reliability Evaluation Tool for Main Control Rooms in Nuclear Power Plants. In: **Transactions of Korean Nuclear Society Spring Meeting**, Jeju, Korea, May 17-18, 2012.

LEWES, G. H. **Problems of life and mind**. First Series: The foundations of a creed. Vol. 2. Ann Arbor, USA: University of Michigan Library Reprinting Series, 2005.

LIM, K. Y.; LONG, J. B.; SILCOCK, N. Integrating Human Factors with the Jackson System Development Method: An Illustrated Overview. **Ergonomics**, v. 35, p. 1135-1161, 1992.

LIN, Q.-L.; WANG, D.-J.; LIN, W.-G.; LIU, H. C. Human reliability assessment for medical devices based on failure mode and effects analysis and fuzzy linguistic theory. **Safety Science**, v. 62, p. 248-256, 2014.

LOIS, E.; DANG, V. N.; FORESTER, J. A.; BROBERG, H.; MASSAIU, S.; HILDEBRANDT, M.; BRAARUD, P. Ø.; PARRY, G.; JULIUS, J.; BORING, R.; MÄNNISTÖ, I.; BYE, A. **NUREG/IA-0216, V. 1: International HRA Empirical Study – Phase 1 Report: Description of Overall Approach and Pilot Phase Results from Comparing HRA Methods to Simulator Data**. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2009.

LYONS, M.; ADAMS, S.; WOLOSHYNOWYCH, M.; VINCENT, C. Human reliability analysis in healthcare: A review of techniques. **International Journal of Risk and Safety in Medicine**, v. 16, p. 223–237, 2004.

MADONNA, M.; MARTELLA, M.; MONICA, L.; MAINI, E. P.; TOMASSINI, L. The Human Factor in Risk Assessment: Methodological Comparison between Human Reliability Analysis Techniques. **Prevention Today**, v. 5, n. 1/2, p. 67-83, 2009.

MAGUIRE R. Validating a process for understanding human error probabilities in complex human computer interfaces. In: **Proceedings of the Second Workshop on Complexity in Design**. Glasgow: Glasgow University Press, p. 81-89, 2005.

MALIK, R.; WHITE, P. S.; MACEWEN, C. J. Using human reliability analysis to detect surgical error in endoscopic DCR surgery. **Clinical Otolaryngology & Allied Sciences**, v. 28, n. 5, p. 456-460, 2003.

MARQUES, R. L.; DUTRA, I. Redes bayesianas: o que são, para que servem, algoritmos e exemplos de aplicações. Coppe Sistemas – UFRJ, 2006. Disponível em: <<http://www.cos.ufrj.br/~ines/courses/cos740/leila/cos740/Bayesianas.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2008.

MARTINS, M. R. **Considerações sobre Análise de Confiabilidade e Risco**. 2013. 900 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MARTINS, M. R.; MATURANA, M. C. The application of the Bayesian networks in the human reliability analysis. In: **Proceedings of 2009 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2009**, v. 13, p. 341–348, November 13–19, 2009a.

MARTINS, M. R.; MATURANA, M. C. Application of Bayesian networks in the analysis of human contribution in collision accidents. In: **Proceedings of the ASME 28th international conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering – OMAE2009**, v. 2, p. 321-329, 2009b.

MARTINS, M. R.; MATURANA, M. C. Human error contribution in collision and grounding of oil tankers. **Risk Analysis**, v. 30, n. 4, p. 674-698, 2010.

MARTINS, M. R.; MATURANA, M. C. Application of Bayesian belief networks to the human reliability analysis of an oil tanker operation focusing on collision accidents. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 110, p. 89–109, 2013.

MARTINS, M. R.; FRUTUOSO E MELO, P. F. F.; MATURANA, M. C. Methodology for system reliability analysis during the conceptual phase of complex system design considering human factors. In: **Proceeding of the ANS PSA 2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis**, Sun Valley, ID, April 26-30, 2015, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 2015.

MATURANA, M. C. **Aplicação de redes bayesianas na análise da contribuição do erro humano em acidentes de colisão**. 2010. 164f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MEISTER, D. **The history of human factors and ergonomics**, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1999.

MEYER, P.; LE BOT, P.; PESME, H. MERMOS: an extended second generation HRA method. In: **Proceedings of IEEE 8th Human Factors and Power Plants (HFPP) and 13th Annual HPRCT Meeting**, Monterey, CA, USA, August 26-31, 2007.

MKRTCHYAN, L.; PODOFILLINI, L.; DANG, V. N. Bayesian belief networks for human reliability analysis: A review of applications and gaps, **Reliability Engineering and System Safety**, v. 139, p. 1-16, July, 2015.

- MITCHELL, M. **Complexity: a guided tour**. New York: Oxford University, 2009.
- MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- MOIENI, P.; SPURGIN, A. J.; SINGH, A. Advances in Human Reliability Analysis Methodology. Part I: Frameworks, Models, and Data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 44(1), p. 27-55, 1994a.
- MOIENI, P.; SPURGIN, A. J.; SINGH, A. Advances in Human Reliability Analysis Methodology. Part II: PC based HRA Software. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 44(1), p. 57-66, 1994b.
- MOSLEH, A. PRA: A Perspective on Strengths, Current Limitations, and Possible Improvements. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 46, n. 1, 2014.
- MOSLEH, A.; CHANG, Y. H. Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 83, p. 241–253, 2004.
- MOURA, R.; BEER, M.; PATELLI, E.; LEWIS, J.; KNOLL, F. Human error analysis: Review of past accidents and implications for improving robustness of system design. In: NOWAKOWSKI et al. (Eds.). **Safety and Reliability: Methodology and Applications**. London: Taylor & Francis Group, 2014.
- MUNZENMAIER, C.; RUBIN, N. **Bloom's Taxonomy: What's Old Is New Again**. Santa Rosa: The eLearning Guild Research, Perspectives, 2013. Disponível em: <<http://www.elearningguild.com/research/archives/index.cfm?id=164&action=viewonly>>. Acesso em: 21 nov. 2015.
- NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Preferred Reliability Practice PD-ED-1273: Quantitative Reliability Requirements Used as Performance-Based Requirements for Space Systems**. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1995a.
- NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Preferred Reliability Practice PD-AP-1313: System Reliability Assessment Using Block Diagramming Methods**. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1995b.
- NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA/SP-2007-6105: NASA Systems Engineering Handbook**. Revision 1. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 2007.
- NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA/SP-2011-3421: Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners**. 2nd ed. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 2011.
- NOBACK, C. R.; STROMINGER, N. L.; DEMAREST, R. J.; RUGGIERO, D. A. **The Human Nervous System: Structure and Function**. 6th ed. New Jersey: Humana Press, 2005.

NORMAN, D. O.; KURAS, M. L. Engineering Complex Systems. In: BRAHA, D.; MINAI, A. A.; BAR-YAM, Y (Eds.). Complex Engineered Systems: Science Meets Technology. Cambridge: Springer, 2006. p. 206-245.

NORSYS SOFTWARE CORP. Application for Belief Networks and Influence Diagrams: User's Guide. Vancouver, BC, Canada: Norsys Software Corp., 2005. Disponível em: <<http://www.norsys.com>>. Acesso em: 06 jun. 2008.

NUSSENZWEIG, H. M. **Complexidade e Caos**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1999.

OECD/NEA – NUCLEAR ENERGY AGENCY. Committee on the Safety of Nuclear Installations – CSNI. **NEA/CSNI/R(2012)11**: Use and Development of Probabilistic Safety Assessment: An Overview of the Situation at the End of 2010. Issy-les-Moulineaux: 2012.

OECD/NEA – NUCLEAR ENERGY AGENCY; Committee on the Safety of Nuclear Installations – CSNI. **NEA/CSNI/R(2015)1**: Establishing the Appropriate Attributes in Current Human Reliability Assessment Techniques for Nuclear Safety. Committee on the Safety of Nuclear Installations – CSNI, March, 2015.

O'HARA, J. M.; HALL, R. E. Advanced control rooms and crew performance issues: implications for human reliability. **IEEE: Transactions on Nuclear Science**, v. 39, n. 4, p. 919-923, 1992.

OXSTRAND, J. **NKS_R-2009_77**: Human Reliability Guidance - How to Increase the Synergies Between Human Reliability, Human Factors, and System Design & Engineering. Phase 2: The American Point of View - Insights of How the US nuclear Industry Works with Human Reliability Analysis. Interim Report. Roskilde, Denmark: Nordic nuclear safety research, December, 2010.

OXSTRAND, J.; BORING R. L. **NKS-R-77**: Human Reliability Guidance – How to Increase the Synergies Between Human Reliability, Human Factors, and System Design & Engineering. Phase 1: The Nordic Point of View – A User Needs Analysis. Interim Report. Roskilde, Denmark: Nordic nuclear safety research, 2009.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. -H. **Engineering Design: A Systematic Approach**. 3rd ed. London, UK: Springer, 2007.

PAPIN, B. Balancing human and technical reliability in the design of advanced nuclear reactors. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 12, p. 5238-5244, 2011.

PARASURAMAN, R.; SHERIDAN, T. B.; WICKENS, C. D. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. **IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans**, v. 30, n. 3, p. 286-297, 2000.

PARK, K. S.; LEE, J. A new method for estimating human error probabilities: AHP-SLM. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, p. 578–587, 2008.

PARRY, G. W.; LYDELL, B. O. Y.; SPURGIN, A. J.; MOIENI, P.; BEARE, A. N. **TR-100259: An Approach to Analysis of Operator Actions in Probabilistic Risk Assessment**. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1992.

PEARL, J. **Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Network of Plausible Inference**. San Mateo, California, USA Morgan Kaufmann, 1988.

PERROW, C. **Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies**. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1999.

PESME, H.; LE BOT, P.; MEYER, P. Little stories to explain Human Reliability Assessment: a practical approach of the MERMOS method. In: **Proceedings of IEEE 8th Human Factors and Power Plants (HFPP) and 13th Annual HPRCT Meeting**, Monterey, CA, USA, August 26-31, 2007.

PHILLIPS, L. D.; HUMPHREYS, P. C.; EMBREY, D. E. **A Sociological Approach to assessing Human Reliability**. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1983

POUCET A. (ED). **EUR 12222: Human factors reliability benchmark exercise – HF-RBE**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1989.

POWERS, D. A. Letter to the Executive Director for Operations (US NRC) about NUREG-1624, Revision 1, “Technical basis and implementation guidelines technique for human event analysis (ATHEANA)”. In: U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION – USNRC. **NUREG-1125, V. 21: A Compilation of Reports of The Advisory Committee on Reactor Safeguards**. Washington D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2000.

PYY, P.; HIMANEN, R. A Praxis Oriented Approach for Plant Specific Human Reliability Analysis – Finnish Experience from Olkiluoto NPP. In: CACCIABUE, P. C.; PAPAOGLOU, I. A. (Ed) **Proceedings of the Probabilistic Safety and Management’96 (ESREL’96 – PSAM-III)**. London: Springer, 1996.

QASIM, S.; HARAHAH, I. S. H. Human Error Quantification Technique: A Brief Review. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and technology**, 2013.

RANGRA, S.; SALLAK, M.; SCHÖN, W.; VANDERHAESEN, F. Human reliability assessment under uncertainty – towards a formal method. **Procedia Manufacturing**, 2015.

RASMUSSEN, J. **Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and other distinctions in human performance models**. IEEE: Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 13, n. 3, p. 257-266, 1983.

RASMUSSEN, J.; DUNCAN, K.; LEPLT, J. (Ed). **New Technology and Human Error**. Chichester: John Wiley and Sons, 1987.

RASMUSSEN, J.; PEDERSEN, O. M.; CARNINO, A.; GRIFFON, M.; MANCINI, C.; GAGNOLET, P. **Classification System for Reporting events involving human malfunctions**, Report Risø-M-240, DK-4000. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratories, 1981.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications**. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

REASON, J. **Human Error**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

REASON, J. T.; EMBREY, D. E. **Human Factors Principles relevant to the Modelling of Human Error in Abnormal Conditions of Nuclear and Major Hazardous Installations**, Report ECI-1164-B7221-84-UK. Parbold, Lancs, England: Human Reliability Associates Ltd, 1985.

REER, B. A probabilistic method for analyzing the reliability effect of time and organizational factors. **European Journal of Operational Research**, v. 75, n. 3, p. 521-539, 1994.

REER B. Conclusions from Occurrences by Descriptions of Actions (CODA). In: SJÖBERG, B. M. D. (Ed.). **New Risk Frontiers: Proceedings of the 1997 Annual Meeting of the Society for Risk Analysis-Europe**. Stockholm: 1997.

REER, B. Retrospective Event Analysis Using CODA and Perspectives on Human Error Prediction. In: MODARRES, M. (Ed.). **Risk-Informed Performance-Based Regulation: Proceedings of the International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment (PSA '99)**, 22-26 Aug. 1999, Washington DC, USA. Illinois, USA: American Nuclear Society, LaGrange Park, v. 2, p. 1337-1345, 1999.

REER, B. **LEA 09-302: Outline of a Method for Quantifying Errors of Commission**. Switzerland: Laboratory for Energy Systems Analysis, Paul Scherrer Institute, 2009a.

REER, B. **LEA 09-304: An Approach for Ranking EOC Situations Based on Situational Factors**. Switzerland: Laboratory for Energy Systems Analysis, Paul Scherrer Institute, 2009b.

REER, B.; DANG, V. N. **The Commission Errors Search and Assessment (CESA) Method**. Switzerland: Laboratory for Energy Systems Analysis – LEA, Paul Scherrer Institut, May, 2007.

REER, B.; DANG, V. N. **LEA 09-303: Situational Features of Errors of Commission Identified from Operating Experience**. Switzerland: Laboratory for Energy Systems Analysis, Paul Scherrer Institute, 2009.

REER, B.; DANG, V. N.; HIRSCHBERG, S. The CESA method and its application in a plant-specific pilot study on errors of commission. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 83, i. 2, p. 187-205, 2004.

ROBERT, C. P.; CASELLA, G. **Monte Carlo Statistical Methods**. 2nd Ed. New York: Springer, 2004.

ROGNIN, L.; BLANQUART, J. P. Human communication, mutual awareness and system dependability. Lessons learnt from air-traffic control field studies. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 71, n. 3, p. 327–336, 2001.

ROSA, E. A.; HUMPHREYS, P. C.; SPETTELL, C. M.; EMBREY, D. E. **NUREG/CR-4016, Vol. I**: Application of SLIM-MAUD: A Test of an Interactive Computer-Based Method for Organizing Expert Assessment of Human Performance and Reliability. Long Island, N. Y.: Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory, September, 1985.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence – A modern Approach**, Second Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

SALVENDY, G. **Handbook of Human Factors and Ergonomics**. 3rd Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

SCHNEIDER, M.; SOMERS, M. Organizations as complex adaptive systems: Implications of Complexity Theory for leadership research. **The Leadership Quarterly**, v.17, p. 351–365, 2006.

SCHROER, S.; MODARRES, M. An event classification schema for evaluating site risk in a multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 117, p. 40–51, 2013.

SEAVER, D. A.; STILLWELL, W. G. **NUREG/CR-2743**: Procedures for using expert judgement to estimate human error probabilities in nuclear power plant operations. Washington, D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1983.

SHEN, S. H.; MOSLEH, A. **Human Error Probability Methodology**, Report RAN:96-002. Calvert Cliffs Nuclear Power Plant: BGE. 1996.

SHEPHERD, A. Analysis and training in information technology tasks. In: D. DIAPER, Ed. **Task Analysis for Human-Computer Interaction**, pp. 15-55. Chichester: Ellis Horwood, 1989.

SHORROCK, S. T.; KIRWAN, B. Development and application of a human error identification tool for air traffic control. **Applied Ergonomics**, v. 33, p. 319-336, 2002.

SIMPSON, E. J. The classification of educational objectives: Psychomotor domain. **Illinois Journal of Home Economics**, v. 10, n. 4, p. 110-144, 1966.

SPETTELL, C. M.; ROSA, E. A.; HUMPHREYS, P. C.; EMBREY, D. E. **NUREG/CR-4016, Vol. II**: Application of SLIM-MAUD: A Test of an Interactive Computer-Based Method for Organizing Expert Assessment of Human Performance and Reliability. Long Island, N. Y.: Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory, October, 1986.

SPURGIN, A. J.; MOIENI, P.; GADDY, C. D.; PARRY, G.; ORVIS, D. D.; SPURGIN, J. P.; JOKSIMOVICH, V.; GAVER, D. P.; HANNAMAN, G. W. **EPRI NP-6937**: Operator reliability experiments using power plant simulators, Vol. 1. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 1990a.

SPURGIN, A. J.; MOIENI, P.; GADDY, C. D.; PARRY, G.; ORVIS, D. D.; SPURGIN, J. P.; JOKSIMOVICH, V.; GAVER, D. P.; HANNAMAN, G. W. **EPRI NP-6937**: Operator reliability experiments using power plant simulators, Vol. 2. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 1990b.

SPURGIN, A. J.; MOIENI, P.; GADDY, C. D.; PARRY, G.; ORVIS, D. D.; SPURGIN, J. P.; JOKSIMOVICH, V.; GAVER, D. P.; HANNAMAN, G. W. **EPRI NP-6937-L**: Operator reliability experiments using power plant simulators, Vol. 3. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 1990c.

STANTON, N., A. Hierarchical task analysis: Developments, applications, and extensions. **Applied Ergonomics**, v. 37, n. 1, p. 55–79, 2006.

STEWART, M. G. Modelling human error rates for human reliability analysis of a structural design task. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 36, n. 2, p. 171-180, 1992.

STRÄETER, O. **Evaluation of Human Reliability on the Basis of Operational Experience**. 2000. 400 p. Tese (Doutorado) – Faculty of Economics and Social Sciences, Munich Technical University, 2000.

STRÄETER, O. Overview about the CAHR Method and its Application in Assessing Errors of Commission. In: NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA. **NEA/CSNI/R(2002)3**: Proceedings of the International Workshop “Building the new HRA: Errors of Commission from research to application”. France: Committee on the Safety of Nuclear Installations – CSNI, 2003.

STRÄETER, O. **Cognition and safety – An Integrated Approach to Systems Design and Performance Assessment**. Aldershot: Ashgate, 2005.

SWAIN, A. D.; GUTTMANN, H. E. **NUREG/CR-1278**: Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Albuquerque: Sandia National Laboratories; Washington, D. C.: United States Nuclear Regulatory Commission, 1983.

SWAIN, A. D. **NUREG/CR-4772/SAND86-1996**: Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure. Washington, D. C.: Sandia National Laboratories for the U. S. Nuclear Regulatory Commission, February, 1987.

USGAO – UNITED STATES GENERAL ACCOUNTING OFFICE, **EMD-80-109**: Three Mile Island: The Most Studied Nuclear Accident in History. Washington, D. C.: General Accounting Office, 1980.

USNRC – UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **WASH-1400 (NUREG-75/014)**: Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants. Washington, D. C.: 1975.

USNRC – UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **NUREG-1150**: Severe Accident Risks: An Assessment for Five U. S. Nuclear Power Plants. Washington, D. C.: 1990. 3 v.

USNRC – UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **NUREG-0800, Section 19.0, Draft Revision 3**: Standard Review Plan: Probabilistic Risk Assessment and Severe Accident Evaluation for New Reactors. Washington, D. C.: United States Nuclear Regulatory Commission, 2014.

WAKEFIELD, D.; PARRY, G.; HANNAMAN, G.; SPURGIN, A. **TR-101711**: SHARPI: A Revised Systematic Human Action Reliability Procedure. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, December, 1992.

WATERSON, P.; CHRIS, W.; CLEGG, C. W.; ROBINSON, M. A. Trade-offs between reliability, validity and utility in the development of human factors methods. In: BROBERG, O.; FALLENTIN, N.; HASLE, P.; JENSEN, P. L.; KABEL, A.; LARSEN, M.E.; WELLER, T. (Eds.). **Nordic Ergonomics Society Annual Conference – 46**, p. 605-609, 2014.

WHALEY, A. M.; KELLY, D. L.; BORING, R. L.; GALYEAN, W. J. **INL/EXT-10-18533, Rev. 2**: SPAR-H Step-by-Step Guidance. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2011.

WICKENS, C. D.; LIU, Y.; BECKER, S. E. G.; LEE, J. D. **An Introduction to Human Factors Engineering**, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2004.

WILLIAMS, J. C. HEART – A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by means of Human Factors Engineering Technology. In: **Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant**, Southport: Safety and Reliability Society, 16 September, 1985.

WILLIAMS, J. C. A proposed Method for Assessing and Reducing Human error. In: **Proceedings of the 9th Advance in Reliability Technology Symposium (ARTS)**, University of Bradford, 1986.

WILLIAMS, J. C. A Data-based method for assessing and reducing Human Error to improve operational experience. In: **Proceedings of IEEE 4th. Conference on Human Factors in Power Plants**, Monterey, California, June, 1988.

WILLIAMS, J. C. Human Reliability Data – The State of the Art and the Probabilities. In: **Proceedings of Reliability '89**. Brighton, United Kingdom: June, 1989.

WILLIAMS, J. C. Toward an Improved Evaluation Analysis Tool for Users of HEART. In: **Proceedings of the International Conference on Hazard identification and Risk Analysis, Human Factors and Human Reliability in Process Safety**, Orlando, Florida, 15-17 January 1992.

WOOD, S. D. **Extending GOMS to Human Error and Applying it to Error-Tolerant Design**. Tese de doutorado. Michigan: University of Michigan, 2000.

WREATHALL, J. **NUS-4159**: Operator Action Trees: An Approach to Quantifying Operator Error Probability During Accident Sequences, Gaithersburg: NUS Corp., 1982.

WREATHALL, J.; ROTH, E.; BLEY, D.; MULTER, J. **DOT/FRA/ORD-03/15: Human Reliability Analysis in Support of Risk Assessment for Positive Train Control**. Washington, D. C.: U. S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2003.

WU, W.; YOSHIKAWA, H. A pilot study on human cognitive reliability (HCR) by human model simulation. In: **Proceedings of Intelligent Information Systems, 1997 – IIS '97**, v. 8, i. 10, p. 95–99, 1997.

YAO, B.; JIANG, X.; KHOSLA, A.; LIN, A. L.; GUIBAS, L.; FEI-FEI, L. Human action recognition by learning bases of action attributes and parts. In: **2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)**, IEEE, p. 1331-1338, 2011.

YU, F. J.; HWANG S. L.; HUANG, Y. H. Task Analysis for Industrial Work Process from Aspects of Human. **Reliability and System Safety Risk Analysis**, v. 19, n. 3, p. 401-415, 1999.

YU, F. J.; HWANG, S. L.; HUANG, Y. H.; LEE, J. S. Application of human error criticality analysis for improving the initiator assembly process. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 26, n. 1, p. 87-99, 2000.

APÊNDICE A – TABELAS DE PROBABILIDADES PARA A RB NA FIG. 27

Os dados utilizados para o preenchimento das tabelas de probabilidades para os nós da RB na Fig. 27 podem ser obtidos diretamente do texto, da seguinte forma:

- Para os nós “THERP: Tab. 20-10 (4)”, “THERP: Tab. 20-11 (3)” e “THERP: Tab. 20-12 (5)”, as tabelas de probabilidades a priori apresentam dados idênticos aos da Tab. 26;
- Os nós “Num. erros: 5”, “Num. erros: 5” e “Num. erros: 2” são determinísticos, e apresentam valores 5, 5 e 2, respectivamente;
- Os nós “Erros: 10 (4)”, “Erros: 11 (3)” e “Erros: 12 (5)” apresentam TPC idênticas às Tabelas 8, 9 e 10, respectivamente;
- O nó “Observações” é determinístico, e apresenta valor igual a 100;
- O nó “Peso da Subpopulação” apresenta tabela de probabilidades a priori com dados idênticos aos da Tab. 31;
- As tabelas de probabilidades para os nós “Erros observados” e “sinais contrários e ausência de sinais” podem ser obtidas a partir das informações apresentadas no texto. Para facilitar a reprodução do exemplo na seção 3, no entanto, estas tabelas são apresentadas resumidamente nas Tabs. 111 e 112, respectivamente.

Tab. 111 – TPC para o nó “Sinais contrários e ausência de sinais” da RB da Fig. 27

Nós Pais				Estados do nó "sinais contrários e ausência de sinais"	Estados do nó "sinais contrários e ausência de sinais"				Estados do nó "sinais contrários e ausência de sinais"	Estados do nó "sinais contrários e ausência de sinais"				Estados do nó "sinais contrários e ausência de sinais"
Peso da Subpopulação	Erros: 11 (3)	Erros: 12 (5)	Erros: 10 (4)		Peso da Subpopulação	Erros: 11 (3)	Erros: 12 (5)	Erros: 10 (4)		Peso da Subpopulação	Erros: 11 (3)	Erros: 12 (5)	Erros: 10 (4)	
A_1_10_4	Qualquer	Qualquer	0	A_1_11_3	Qualquer	Qualquer	A_1_12_5	Qualquer	Qualquer	0	0,0005	0,001	0,002	0,003
			0,025											
			0,05											
			0,075											
			0,1											
			0,125											
			0,15											
			0,175											
			0,2											
			0,225											
			0,25											
			0,275											
			0,3											
			0,325											
			0,35											
			0,375											
			0,4											
			0,425											
			0,45											
			0,475											
			0,5											
A_1_10_4	Qualquer	Qualquer	0	A_1_11_3	Qualquer	Qualquer	A_1_12_5	Qualquer	Qualquer	0	0,0005	0,001	0,002	0,003
			0,025											
			0,05											
			0,075											
			0,1											
			0,125											
			0,15											
			0,175											
			0,2											
			0,225											
			0,25											
			0,275											
			0,3											
			0,325											
			0,35											
			0,375											
			0,4											
			0,425											
			0,45											
			0,475											
			0,5											

Tab. 112 – TPC para o nó “Erros Observados” da RB da Fig. 27

Nós Pais				Estados do nó "Erros Observados"																							
Peso da Subpopulação	Observações	Erros: 11 (3)	Erros: 12 (5)	Erros: 10 (4)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21 ou mais	
A_1_10_4	100	Qualquer	Qualquer	0	1.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.99E-12
				0.025	7.95E-01	2.04E+01	2.59E+01	2.17E+01	1.35E+01	6.64E+00	2.69E+00	9.28E-01	2.76E-01	7.75E-02	1.69E-02	3.55E-03	6.75E-04	1.17E-04	1.87E-05	2.74E-06	3.74E-07	4.73E-08	5.60E-09	6.19E-10	6.43E-11	1.71E-11	
				0.05	5.92E-01	3.12E+00	8.12E+00	1.40E+01	1.78E+01	1.80E+01	1.50E+01	1.06E+01	6.49E+00	3.49E+00	1.67E+00	7.20E-01	2.81E-01	1.00E-01	3.27E-02	9.88E-03	2.76E-03	7.18E-04	1.74E-04	3.96E-05	8.44E-06	2.08E-06	
				0.075	4.11E-02	3.33E-01	1.34E+00	3.55E+00	6.97E+00	1.09E+01	1.39E+01	1.52E+01	1.43E+01	1.18E+01	8.74E+00	5.80E+00	3.49E+00	1.91E+00	9.65E-01	4.48E-01	1.93E-01	7.74E-02	2.89E-02	1.01E-02	3.32E-03	1.44E-03	
				0.1	2.66E-03	2.95E-02	1.62E-01	5.89E-01	1.59E+00	3.39E+00	5.96E+00	8.89E+00	1.15E+01	1.30E+01	1.32E+01	1.20E+01	9.88E+00	7.43E+00	5.13E+00	3.27E+00	1.93E+00	1.06E+00	5.43E-01	2.60E-01	1.17E-01	8.08E-02	
				0.125	1.59E-04	2.27E-03	1.60E-02	7.49E-02	2.59E-01	7.11E-01	1.61E+00	3.09E+00	5.13E+00	7.48E+00	9.73E+00	1.14E+01	1.21E+01	1.17E+01	1.03E+01	8.47E+00	6.43E+00	4.54E+00	2.99E+00	1.84E+00	1.07E+00	1.14E+00	
				0.15	8.75E-06	1.54E-04	1.35E-03	7.77E-03	3.33E-02	1.13E-01	3.15E-01	7.46E-01	1.53E+00	2.76E+00	4.44E+00	6.40E+00	8.38E+00	1.00E+01	1.10E+01	1.11E+01	1.04E+01	9.08E+00	7.39E+00	5.63E+00	4.02E+00	6.63E+00	
				0.175	4.42E-07	9.38E-06	9.84E-05	6.82E-04	3.51E-03	1.43E-02	4.80E-02	1.37E-01	3.37E-01	7.31E-01	1.41E+00	2.45E+00	3.85E+00	5.53E+00	7.29E+00	8.87E+00	9.99E+00	1.09E+01	1.02E+01	9.81E+00	8.06E+00	1.21E+01	
				0.2	2.04E-08	5.09E-07	6.30E-06	5.15E-05	3.12E-04	1.40E-03	5.93E-03	1.99E-02	5.78E-02	1.48E-01	3.36E-01	6.88E-01	1.28E+00	2.16E+00	3.35E+00	4.81E+00	6.38E+00	7.85E+00	9.09E+00	9.81E+00	9.93E+00	4.41E+01	
				0.225	8.51E-10	2.47E-08	3.55E-07	3.37E-06	2.37E-05	1.32E-04	6.08E-04	2.37E-03	8.00E-03	2.37E-02	6.27E-02	1.49E-01	3.21E-01	6.30E-01	1.14E+00	1.89E+00	2.92E+00	4.19E+00	5.61E+00	7.02E+00	8.26E+00	6.78E+01	
				0.25	3.21E-11	1.07E-09	1.76E-08	1.92E-07	1.55E-06	9.94E-06	5.24E-05	2.35E-04	9.10E-04	3.10E-03	9.40E-03	2.56E-02	6.34E-02	1.43E-01	2.96E+00	5.66E-01	1.00E+00	1.65E+00	2.54E+00	3.65E+00	4.93E+00	8.51E+01	
				0.275	1.08E-12	4.10E-11	7.70E-10	9.54E-09	8.77E-08	6.39E-07	3.84E-06	1.95E-05	8.62E-05	3.34E-04	1.15E-03	3.58E-03	1.01E-02	2.59E-02	6.10E-02	1.33E-01	2.67E-01	5.01E-01	8.76E+00	1.43E+00	2.20E+00	9.45E+01	
				0.3	3.23E-14	1.39E-12	2.94E-11	4.12E-10	4.28E-09	3.52E-08	2.39E-07	1.37E-06	6.85E-06	3.00E-05	1.17E-04	4.10E-04	1.30E-03	3.78E-03	1.01E-02	2.48E-02	5.64E-02	1.19E-01	2.36E-01	4.36E-01	7.58E-01	9.84E+01	
				0.325	8.52E-16	4.10E-14	9.78E-13	1.54E-11	1.80E-10	1.66E-09	1.27E-08	8.18E-08	4.58E-07	2.25E-06	9.87E-06	3.89E-05	1.39E-04	4.53E-04	1.35E-03	3.74E-03	9.56E-03	2.28E-02	5.05E-02	1.05E-01	2.05E-01	9.96E+01	
				0.35	1.96E-17	1.05E-15	2.81E-14	4.94E-13	6.45E-12	6.67E-11	5.68E-10	4.11E-09	2.57E-08	1.42E-07	6.94E-07	3.06E-06	1.22E-05	4.45E-05	1.49E-04	4.60E-04	1.31E-03	3.50E-03	8.68E-03	2.02E-02	4.40E-02	9.99E+01	
				0.375	3.87E-19	2.32E-17	6.90E-16	1.35E-14	1.97E-13	2.27E-12	2.15E-11	1.74E-10	1.21E-09	7.42E-09	4.05E-08	1.99E-07	8.85E-07	3.60E-06	1.34E-05	4.61E-05	1.47E-04	4.36E-04	1.21E-03	3.12E-03	7.59E-03	1.00E+02	
				0.4	6.53E-21	4.36E-19	1.44E-17	3.13E-16	5.06E-15	6.48E-14	6.84E-13	6.12E-12	4.74E-11	3.23E-10	1.96E-09	1.07E-08	5.29E-08	2.39E-07	9.89E-07	3.78E-06	1.34E-05	4.41E-05	1.36E-04	3.90E-04	1.05E-03	1.00E+02	
				0.425	9.26E-23	6.85E-21	2.51E-19	6.05E-18	1.08E-16	1.54E-15	1.80E-14	1.79E-13	1.54E-12	1.16E-11	7.80E-11	4.72E-10	2.69E-09	1.29E-08	5.95E-08	2.52E-07	9.89E-07	3.61E-06	1.23E-05	3.93E-05	1.18E-04	1.00E+02	
				0.45	1.09E-24	8.89E-23	3.60E-21	9.63E-20	1.91E-18	3.05E-17	3.89E-16	4.27E-15	4.69E-14	3.40E-13	2.53E-12	1.60E-11	1.00E-10	5.69E-10	2.89E-09	1.36E-08	5.90E-08	2.39E-07	9.00E-07	3.18E-06	1.05E-05	1.00E+02	
				0.475	1.04E-26	9.39E-25	4.20E-23	1.24E-21	2.72E-20	4.74E-19	6.78E-18	8.24E-17	8.67E-16	8.02E-15	6.60E-14	4.89E-13	3.28E-12	2.01E-11	1.13E-10	5.86E-10	2.82E-09	1.26E-08	5.25E-08	2.05E-07	7.51E-07	1.00E+02	
				0.5	7.89E-29	7.89E-27	3.90E-25	1.28E-23	3.09E-22	5.94E-21	9.40E-20	1.26E-18	1.47E-17	1.50E-16	1.37E-15	1.12E-14	8.29E-14	5.61E-13	3.49E-12	2.00E-11	1.06E-10	5.75E-10	2.42E-09	1.04E-08	4.23E-08	1.00E+02	
A_1_11_3	100	Qualquer	Qualquer	0	1.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
				0.0005	9.51E+01	4.76E+00	1.18E-01	1.93E-03	2.34E-05	2.24E-07	1.78E-09	1.19E-11	6.94E-14	3.55E-16	1.62E-18	6.61E-21	2.45E-23	8.31E-26	2.58E-28	7.41E-31	1.97E-33	4.87E-36	1.18E-36	1.18E-36	0.00E+00	9.44E-12	
				0.001	9.05E+01	4.90E+00	4.49E-01	1.47E-02	3.56E-04	6.83E-06	1.09E-07	1.46E-09	1.70E-11	1.74E-13	1.58E-15	1.30E-17	9.62E-20	6.52E-22	4.05E-24	2.33E-26	1.24E-28	6.12E-31	2.82E-33	1.22E-35	1.18E-36	9.99E-12	
				0.0015	8.61E+01	1.29E+01	9.61E-01	4.72E-02	1.72E-03	4.96E-05	1.18E-06	2.38E-08	4.15E-10	6.38E-12	8.72E-14	1.07E-15	1.19E-17	1.21E-19	1.13E-21	9.76E-24	7.79E-26	5.78E-28	4.40E-30	2.60E-32	1.58E-34	9.44E-12	
				0.002	8.19E+01	1.64E+01	1.63E+00	1.07E-01	5.18E-03	1.99E-04	6.32E-06	1.70E-07	3.96E-09	8.73E-11	1.48E-12	2.43E-14	3.61E-16	4.89E-18	6.09E-20	7.75E-23	9.83E-26	6.82E-28	5.90E-30	4.79E-32	3.00E-34	1.00E+01	
				0.0025	7.79E+01	1.95E+01	2.42E+00	1.98E-01	1.20E-02	5.80E-04	2.30E-05	7.74E-07	2.26E-08	5.78E-10	1.32E-11	2.70E-13	5.02E-15	8.52E-17	1.33E-18	1.91E-20	2.54E-22	3.14E-24	3.63E-26	3.93E-28	3.99E-30	9.46E-12	
				0.003	7.40E+01	2.23E+01	3.32E+00	3.26E-01	2.38E-02	1.38E-03	6.55E-05	2.65E-06	9.26E-08	2.85E-09	7.80E-11	1.92E-12	4.29E-14	8.73E-16	1.63E-17	2.82E-19	4.50E-21	6.69E-23	9.29E-25	1.21E-26	1.47E-28	1.00E+01	
				0.0035	7.04E+01	2.47E+01	4.30E+00	4.93E-01	4.20E-02	2.83E-03	1.58E-04	7.43E-06	3.04E-07	1.09E-08	3.48E-10	1.00E-11	2.61E-13	6.20E-15	1.35E-16	2.72E-18	5.08E-20	8.82E-22	1.43E-23	2.17E-25	3.08E-27	9.44E-12	
				0.004	6.70E+01	2.69E+01	5.55E+00	7.02E-01	6.83E-02	5.27E-03	3.35E-04	1.81E-05	8.43E-07	3.46E-08	1.27E-09	4.16E-11	1.24E-12	3.37E-14	8.40E-16	1.93E-17	4.13E-19	8.19E-21	1.53E-22	2.63E-24	4.28E-26	1.00E+01	
				0.0045	6.37E+01	2.88E+01	6.44E+00	9.51E-01	1.04E-01	9.05E-03	6.48E-04	3.93E-05	2.07E-06	9.55E-08	3.93E-09	1.45E-10	4.87E-12	1.49E-13	4.19E-15	1.08E-16	2.61E-18	5.82E-20	1.21E-21	2.37E-23	4.33E-25	9.50E-12	
				0.005	6.06E+01	3.04E+01	7.57E+00	1.24E+00	1.51E+01	1.46E-02	1.16E-03	7.85E-05	4.68E-06	2.35E-07	1.08E-08	4.43E-10	1.65E-11	5.61E-13	1.75E-14	5.05E-16	1.35E-17	3.35E-19	7.70E-21	1.68E-22	3.42E-24	1.00E+01	
				0.0055	5.76E+01	3.19E+01	8.72E+00	1.58E+00	2.11E+01	2.24E-02	1.96E-03	1.46E-04	9.38E-06	5.30E-07	2.67E-08	1.21E-09	4.95E-11	1.85E-12	6.37E-14	2.02E-15	5.94E-17	1.62E-18	4.14E-20	9.88E-22	2.21E-23	9.46E-12	
				0.006	5.48E+01	3.31E+01	9.88E+00	1.95E+00	2.85E+01	3.31E-02	3.16E-03	2.56E-04	1.80E-05	1.11E-06	6.09E-08	3.01E-09	1.35E-10	5.50E-12	2.06E-13	7.14E-15	2.29E-16	6.83E-18	1.90E-19	4.95E-21	1.21E-22	1.01E+01	
				0.0065	5.21E+01	3.41E+01	1.10E+01	2.36E+00	3.74E+01	4.70E-02	4.87E-03	4.28E-04	3.25E-05	2.18E-06	1.30E-07	6.94E-09	3.37E-10	1.49E-11	6.06E-13	2.27E-14	7.90E-16	2.55E-17	7.71E-19	2.18E-20	5.77E-22	9.35E-12	
				0.007	4.95E+01	3.49E+01	1.22E+01	2.81E+00	4.80E+01	6.49E-02	7.25E-03	6.86E-04	5.62E-05	4.05E-06	2.60E-07	1.50E-08	7.84E-10	3.74E-11	1.64E-12	6.62E-14	2.48E-15	8.74E-17	2.81E-18	8.54E-20	2.44E-21	1.00E+01	
				0.0075	4.71E+01	3.56E+01	1.33E+01	3.29E+00	6.02E+01	8.74E-02	1.05E-02	1.06E-03	9.42E-05	7.20E-06	4.95E-07	3.06E-08	1.72E-09	8.78E-11	4.12E-12	1.79E-13	7.15E-15	2.68E-16	9.32E-18	3.04E-19	9.31E-21	9.53E-12	
				0.008	4.48E+01	3.61E+01	1.44E+00	3.30E+00	7.43E-01	1.15E-01	4.77E-02	1.59E-03	1.94E-04	1.23E-05	9.02E-07	5.95E-08	3.56E-09	1.94E-10	9.74E-12	4.50E-13	1.93E-14	7.69E-16	2.86E-17	9.95E-19	3.25E-20	1.01E+01	
				0.0085	4.26E+01	3.65E+01	3.51E+01	1.43E+01	3.02E-01	4.70E-01	1.03E-01	2.20E-01	4.70E-02	3.03E-02	1.81E-02	9.81E-03	5.12E-03	2.74E-03	1.40E-03	7.12E-04	3.87E-04	2.09E-04	9.71E-05	3.0.			

APÊNDICE B – TABELAS PARA O CAPÍTULO 5

Tab. 35 – Seleção das fontes de dados

Fonte de Dados		Critérios de Seleção		
Designação		1-Origem da Base de Dados	2-Fiabilidade das Bases e Resultados Quantitativos	3-Disponibilidade dos Dados
APJ	Absolute Probability Judgment	Esta técnica requer a opinião de especialista para a quantificação (BELL; HOLROYD, 2009); não apresenta um banco de dados.	Esta técnica apresenta validade questionável (BELL; HOLROYD, 2009) – foi foco de estudo de validação (KIRWAN, 1988) –, mas é de uso corrente (KIRWAN, 2007).	Alguns dados obtidos com a sua aplicação podem ser encontrados em referências específicas (KIRWAN, 1994; SEAVER; STILLWELL, 1983).
ASEP	Accident Sequence Evaluation Program	A base de dados desta técnica é a THERP (OECD/NEA, 2015; CHANDLER et al., 2006; FORESTER et al., 2006).	Esta técnica é amplamente utilizada na indústria nuclear (KOLACZKOWSKI et al., 2005); visa apresentar valores conservativos (BELL; HOLROYD, 2009; CHANDLER et al., 2006); seus resultados quantitativos podem ser questionáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014) – inclusive em relação à característica de produzir resultados conservativos (FORESTER et al., 2006).	A base de dados pode ser verificada em referências específicas (SWAIN, 1987; GORE et al., 1995; BELL; SWAIN, 1983).
ATHEANA	A Technique for Human Event Analysis	Esta técnica requer a opinião de especialista para a quantificação (FORESTER et al., 2006); não apresenta um banco de dados (OECD/NEA, 2015; BELL; HOLROYD, 2009; CHANDLER et al., 2006).	Esta técnica foi submetida à revisão por pares (OECD/NEA, 2015) e apresenta resultados quantitativos que podem ser questionáveis (FORESTER et al., 2006; LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014); apresenta baixa aplicabilidade fora do setor nuclear (CHANDLER et al., 2006) e poucos exemplos de publicações (FORESTER et al., 2006). É de uso corrente (KIRWAN, 2007), tendo sido referenciada para auxiliar na consideração de erros de comissão (KOLACZKOWSKI et al., 2005).	Alguns dados obtidos com a sua aplicação podem ser encontrados em referências específicas (BARRIERE, 2000; FORESTER et al., 2008; FORESTER et al., 2004; POWERS, 2000; COOPER et al., 1996).
CAHR	Connectionism Assessment of Human Reliability	Esta técnica apresenta dados baseados em simulações e observações operacionais, sendo a quantificação final, no entanto, determinada em consulta a especialistas.	Esta técnica requer mais desenvolvimentos, mas apresenta bom potencial de uso (BELL; HOLROYD, 2009); é de uso corrente (KIRWAN, 2007).	Seus dados são particulares, incluídos em um código (CHANDLER et al., 2006; STRÄETER, 2000, 2003, 2005).
CARA	Controller Action Reliability Assessment	Esta técnica apresenta dados baseados em experiência operacional e CORE-DATA (KIRWAN, 2007).	Esta técnica foi desenvolvida e utilizada restritamente no setor de monitoramento de tráfego aéreo.	Sua base de dados não foi disponibilizada publicamente (BELL; HOLROYD, 2009); as publicações apresentam resultados preliminares (KIRWAN; GIBSON, 2007a, 2007b, 2008).
CBDT	EPRI Cause-Based Decision Tree	Esta técnica está baseada na HCR/ORE, consulta a especialistas e THERP (CHANDLER et al., 2006; FORESTER et al., 2006).	Esta técnica pode apresentar resultados quantitativos aceitáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014), mas seu embasamento teórico é questionável (FORESTER et al., 2006); não apresenta validação independente (CHANDLER et al., 2006).	Os dados quantitativos são apresentados em um código particular (CHANDLER et al., 2006; MOIENI; SPURGIN; SINGH, 1994a, 1994b; PARRY et al., 1992; JULIUS et al., 2005; WAKEFIELD et al., 1992).
CESA	Commission Errors Search and Assessment	Esta técnica não apresenta banco de dados (CHANDLER et al., 2006).	Esta técnica pode apresentar resultados quantitativos aceitáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014); foi referenciada para auxiliar na consideração de erros de comissão (KOLACZKOWSKI et al., 2005); e apresenta pelo menos uma aplicação relatada (CHANDLER et al., 2006).	Esta técnica é de domínio privado (BELL; HOLROYD, 2009). Porém, alguns dados obtidos com a sua aplicação podem ser encontrados em referências específicas (REER; DANG; HIRSCHBERG, 2004; DANG; REER; HIRSCHBERG, 2003; REER; DANG, 2007, 2009; REER, 2009a, 2009b).
CODA	Conclusions from occurrences by descriptions of actions	As informações disponíveis foram consideradas insuficientes para esta avaliação.	Esta fonte requer mais desenvolvimento (BELL; HOLROYD, 2009).	Esta técnica é de domínio privado (BELL; HOLROYD, 2009; REER, 1997, 1999).

Tab. 35 – Seleção das fontes de dados

Fonte de Dados		Critérios de Seleção		
Designação		1-Origem da Base de Dados	2-Fiabilidade das Bases e Resultados Quantitativos	3-Disponibilidade dos Dados
COSIMO	Cognitive Simulation Model	Modelo baseado na opinião de especialistas.	Não foram encontradas evidências do uso efetivo deste modelo (BELL; HOLROYD, 2009).	Este modelo não está disponível publicamente (BELL; HOLROYD, 2009; CACCIABUEH et al., 1992).
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method	Esta técnica apresenta dados derivados de simulação, experiência e opinião de especialistas, e dados de outras técnicas (HEART, THERP e ASEP) (CHANDLER et al., 2006; GERTMAN; BLACKMAN, 1994), sendo que alguns dados não têm sua origem esclarecida pelo autor (OECD/NEA, 2015).	Esta técnica está em uso atualmente (KIRWAN, 2007), apesar de não ser amplamente aplicada (OECD/NEA, 2015); há relato de aplicação nas áreas nuclear, offshore e aeroespacial (CHANDLER et al., 2006); pode apresentar resultados quantitativos aceitáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014), e é considerada um bom complemento para a THERP (CHANDLER et al., 2006).	A base de dados pode ser verificada em referências específicas (HOLLNAGEL, 1993, 1998).
DREAMS	Dynamic Reliability Technique for Error Assessment in Man-machine Systems	As informações disponíveis foram consideradas insuficientes para esta avaliação.	As informações disponíveis foram consideradas insuficientes para esta avaliação.	Esta técnica não está disponível publicamente e há pouco material publicado a seu respeito (BELL; HOLROYD, 2009).
EBT	Enhanced Bayesian THERP	Os dados utilizados nesta técnica são originados na THERP (OECD/NEA, 2015).	Esta técnica foi submetida à revisão por pares (OECD/NEA, 2015) e pode apresentar resultados quantitativos aceitáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014).	A base de dados pode ser verificada em referências específicas (PYY; HIMANEN, 1996; HOLMBERG; PYY, 2000; BLADH; HOLMBERG; PYY, 2009).
FLIM	Failure Likelihood Index Methodology	Esta metodologia não provê HEP (OECD/NEA, 2015) e necessita de consulta a especialistas (FORESTER et al., 2006).	Quando aplicado em condições propícias, esta metodologia apresenta dados robustos (OECD/NEA, 2015); seu modelo linear para refletir a opinião de especialistas pode ser questionável (FORESTER et al., 2006).	Alguns dados obtidos com a sua aplicação podem ser encontrados em referências específicas (EMBREY et al., 1984; CHIEN et al., 1988).
HCR	Human Cognitive Reliability	Esta técnica apresenta dados provenientes de informações juntadas de simuladores e julgamentos de especialistas (MADONNA et al., 2009; OECD/NEA, 2015) – e.g., experimentos da EPRI/ORE (FORESTER et al., 2006).	Esta técnica pode ser questionável para a quantificação (MADONNA et al., 2009) e não apresenta base científica (OECD/NEA, 2015); Seus resultados quantitativos podem ser aceitáveis quando dados específicos (da planta em estudo) estão disponíveis (FORESTER et al., 2006). Seus autores não mais dão suporte à técnica (BELL; HOLROYD, 2009).	Suas fontes de dados não estão disponíveis para este trabalho (FORESTER et al., 2006; PARRY et al., 1992; SPURGIN, 1990a, 1990b, 1990c; HANNAMAN; SPURGIN, 1984; HANNAMAN; SPURGIN; LUKIC, 1985; WU; YOSHIKAWA, 1997).
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique	Esta técnica apresenta dados tabulados a serem matematicamente combinados para refletir tipos de tarefas e PSF (Performance and Shape Factors); Seus dados representam a opinião de especialistas.	Esta técnica está correntemente em uso (BELL; HOLROYD, 2009; KIRWAN, 2007) e pode apresentar resultados quantitativos aceitáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014), sendo avaliada positivamente pela indústria em geral (QASIM; HARAHAP, 2013; LYONS, 2004) e com ressalvas pela indústria nuclear (CHANDLER et al., 2006); apresentou bons resultados em estudos comparativos com dados de referência (KIRWAN, 1988, 1996, 1997b; KIRWAN et al., 1997; KENNEDY et al., 2000) e de validação (MAGUIRE, 2005).	A base de dados pode ser verificada em referências específicas (WILLIAMS, 1985, 1986, 1988, 1989, 1992).
HF PFMEA	Human Factors Process Failure Modes & Effects Analysis	Esta técnica não apresenta banco de dados (CHANDLER et al., 2006), sendo dependente de outras fontes.	Esta técnica é amplamente utilizada (CHANDLER et al., 2006).	Alguns dados obtidos com a sua aplicação podem ser encontrados em referência específica (BROUGHTON et al., 1999).
HRMS	Human Reliability Management System	A base quantitativa desta técnica encontra-se na SLIM, na IDAC (Information, Decision and Action in Crew Context) e na HEART.	As informações disponíveis foram consideradas insuficientes para esta avaliação.	A ferramenta computadorizada que estrutura os dados desta técnica não foi avaliada neste trabalho (KIRWAN; JAMES, 1989; KIRWAN, 1990, 1997a).

Tab. 35 – Seleção das fontes de dados

Fonte de Dados		Critérios de Seleção		
Designação		1-Origem da Base de Dados	2-Fiabilidade das Bases e Resultados Quantitativos	3-Disponibilidade dos Dados
HuRECA	Human Reliability Evaluator for Control Room Actions	A base de dados deste modelo encontra-se na THERP e na ASEP (OECD/NEA, 2015).	Este modelo não foi efetivamente aplicado (OECD/NEA, 2015).	A base de dados pode ser verificada em referência específica (LEE; KIM; JUNG, 2012).
INTENT	-	Esta técnica se baseia em dados empíricos e opiniões de especialistas (a SLIM foi aplicada na construção desta base).	Esta técnica apresenta indícios de validade (KIRWAN, 1998) e pouca evidência de uso efetivo (BELL; HOLROYD, 2009).	A base de dados pode ser verificada em referência específica (GERTMAN et al., 1992).
K-HRA	A Standard HRA Method for PSA in Nuclear Power Plant	A base de dados desta técnica encontra-se na THERP e na ASEP (LOIS et al., 2009).	Pode apresentar resultados quantitativos aceitáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014).	A base de dados pode ser verificada em referência específica (JUNG, 2005).
JHEDI	Justified Human Error Data Information	Esta técnica é baseada na HRMS.	Esta técnica apresentou boa correlação com dados de referência em estudos comparativos (KIRWAN, 1996, 1997b; KIRWAN et al., 1997).	As informações disponíveis foram consideradas insuficientes para esta avaliação.
MERMOS	Méthode d'évaluation de la réalisation des missions opérateurs pour la sûreté	Este método não apresenta um banco de dados (OECD/NEA, 2015). A quantificação concentra-se na observação de erros em simuladores, em exercícios e julgamento de especialistas.	Este método é de domínio próprio e requer mais desenvolvimento (BELL; HOLROYD, 2009); está correntemente em uso (KIRWAN, 2007) e pode apresentar resultados quantitativos aceitáveis (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014).	Os dados gerados pela aplicação deste método não estiveram disponíveis para este trabalho (LE BOT et al., 1997; BIEDER et al., 1998; LE BOT et al., 1999; BIEDER et al., 1999; CARA; BIEDER; LE BOT, 1999; DESMARES; CARA, 2000; LE BOT; BIEDER; VIDAL, 2000; LE BOT; PESME; RUIZ, 2002; BLIRANDO; PESME, 2002; LE BOT, 2004; MEYER; LE BOT; PESME, 2007; PESME; LE BOT; MEYER, 2007; LE BOT; MEYER; PESME, 2007).
NARA	Nuclear Action Reliability Assessment	Esta técnica é baseada na HEART (BELL; HOLROYD, 2009), sendo seus dados oriundos do CORE-DATA (KIRWAN, 2007) e ensaios de laboratório (OECD/NEA, 2015).	Esta técnica foi submetida à revisão por pares (OECD/NEA, 2015) e não apresenta aplicação documentada (CHANDLER et al., 2006).	Uma importante base de dados desta técnica, o CORE-DATA, é de uso restrito (CHANDLER et al., 2006; KIRWAN et al., 2004; KIRWAN et al., 2005).
OATS	Operator Action Tree System	Esta técnica apresenta dados baseados em experimentos e julgamento de especialistas (MADONNA et al., 2009).	Esta técnica apresenta resultados frágeis para a predição da probabilidade de erro (MADONNA et al., 2009).	Esta técnica não está disponível publicamente (BELL; HOLROYD, 2009; HALL; FRAGOLA; WREATHALL, 1982; WREATHALL, 1982).
Paks Data Model	-	Este modelo apresenta dados de simulação (BELL; HOLROYD, 2009).	As informações disponíveis foram consideradas insuficientes para esta avaliação.	Os dados não estiveram disponíveis para esta avaliação (BAREITH et al., 1996).
PC	Paired comparisons	Esta técnica não apresenta banco de dados (BELL; HOLROYD, 2009).	Esta técnica apresenta indícios de validade, mas seus resultados podem ser questionáveis (BELL; HOLROYD, 2009; KIRWAN, 1988).	Alguns dados obtidos com a sua aplicação podem ser encontrados em referências específicas (KIRWAN, 1994; HUNNS; DANIELS, 1980).
SHARP	Systematic Human Action Reliability Procedure	Este processo não apresenta uma técnica quantitativa (FORESTER et al., 2006), e depende de outras fontes para este fim.	As informações disponíveis foram consideradas insuficientes para esta avaliação.	Os dados obtidos com a sua aplicação não estiveram disponíveis para este trabalho (WAKEFIELD et al., 1992; HANNAMAN; SPURGIN, 1984).

Tab. 35 – Seleção das fontes de dados

Fonte de Dados		Critérios de Seleção		
Designação		1-Origem da Base de Dados	2-Fiabilidade das Bases e Resultados Quantitativos	3-Disponibilidade dos Dados
SLIM	Success Likelihood Index Methodology	Esta técnica não apresenta um banco de dados (CHANDLER et al., 2006); está baseada no julgamento de especialistas associado a uma fórmula matemática para sua combinação (BELL; HOLROYD, 2009; FORESTER et al., 2006).	Esta técnica encontra-se em uso atualmente (KIRWAN, 2007), mas é contra-indicada em caso de indisponibilidade de dados de referência (POUCET, 1989). Além disso, apresenta método de quantificação questionável (BELL; HOLROYD, 2009; CHANDLER et al., 2006; KIRWAN, 1988) e o modelo linear que utiliza para refletir a opinião de especialistas também é questionável (FORESTER et al., 2006).	Alguns dados obtidos com a sua aplicação podem ser encontrados em referências específicas (EMBREY et al., 1984; CHIEN et al., 1988; ROSA et al., 1985; SPETTELL et al., 1986; PARK; LEE, 2008).
SPAR-H	Standard Plant Analysis Risk HRA	Esta técnica apresenta probabilidades de falha baseadas na HEART (BELL; HOLROYD, 2009) e calibradas (FORESTER et al., 2006) com base em outras técnicas (THERP, ASEP, CREAM (BELL; HOLROYD, 2009) e opinião de especialistas (NASA, 1995a; OECD/NEA, 2015).	Esta técnica é muito aplicada na indústria nuclear (CHANDLER et al., 2006) e foi revisada por pares (OECD/NEA, 2015). Seu poder de predição quantitativa pode ser questionável (LOIS et al., 2009; BYE et al., 2011; DANG et al., 2014).	A base de dados pode ser verificada em referências específicas (GERTMAN et al., 2004a, 2004b, 2005; WHALEY et al., 2011).
STHR	Socio-Technical Assessment of Human Reliability	Baseada no julgamento de especialista. (BELL; HOLROYD, 2009).	Revisores indicaram que esta técnica não é consistente ou válida para a ACH (BELL; HOLROYD, 2009).	Os dados obtidos com a sua aplicação não estiveram disponíveis para este trabalho (PHILLIPS; HUMPHREYS; EMBREY, 1983).
TESEO	Empirical technique for estimating operator errors	Esta técnica apresenta dados baseados em julgamento de especialistas (MADONNA et al., 2009).	Apesar de não apresentar base teórica (BELL; HOLROYD, 2009), esta técnica tem boa correlação com julgamento de especialistas (MADONNA et al., 2009).	A base de dados pode ser verificada em referência específica (BELLO; COLOMBARI, 1980).
THERP	Technique for Human Error Rate Prediction	A base de dados desta técnica é a experiência de seus elaboradores, simulações, e a opinião de especialistas (MADONNA et al., 2009) (CHANDLER et al., 2006), principalmente de fora da área nuclear (FORESTER et al., 2006).	Apesar da idade, é uma técnica relevante e continua sendo extensivamente utilizada (BORING, 2012; BELL; HOLROYD, 2009; KIRWAN, 2007; FORESTER et al., 2006), sendo a mais difundida técnica para a realização quantitativa da ACH (CHANDLER et al., 2006), e sua base de dados foi considerada o mais completo e complexo esforço quantitativo nesta área (MADONNA et al., 2009). Estudos apontaram evidências estatísticas de sua validade empírica. (OECD/NEA, 2015; LYONS, 2004), tendo apresentado boa correlação com dados de referência em estudos comparativos (KIRWAN, 1988, 1996, 1997b; KIRWAN et al., 1997; KENNEDY et al., 2000). Entretanto, a variabilidade entre especialistas de seus resultados pode ser grande quando muitos fatores devem ser considerados (FORESTER et al., 2006).	A base de dados pode ser verificada em referência específica (SWAIN; GUTTMANN, 1983).
TRC	Time Reliability Correlation	Esta técnica apresenta banco de dados baseado na THERP (CHANDLER et al., 2006).	Esta técnica foi aplicada na área nuclear (CHANDLER et al., 2006).	O software ORCA (DOUGHERTY; FRAGOLA, 1988), utilizado para na quantificação, é particular (CHANDLER et al., 2006; DOUGHERTY; FRAGOLA, 1987).
UMH	University of Maryland Hybrid	Esta técnica utiliza os dados oriundos de diversas técnicas, em especial HCR (CHANDLER et al., 2006).	Foi apresentada uma aplicação para esta técnica (CHANDLER et al., 2006).	A base de dados pode ser verificada em referência específica (SHEN; MOSLEH, 1996).

Tab. 40 – HEP nominal e EF na THERP

Fonte	Item	Descrição	HEP	EF	Fonte	Item	Descrição	HEP	EF
Tab. 20-1	1	Diagnóstico (triagem)	1,00E+00	1	Tab. 20-9	2	Seleção de mostrador (leitura quantitativa ou qualitativa)	5,00E-04	10
	2		5,00E-01	5		3		1,00E-03	3
	3		1,00E-01	10		4		3,00E-03	3
	4		1,00E-02	10		1		3,00E-03	3
	5		1,00E-03	10	Tab. 20-10	2	Ler e recordar informações de mostrador não anunciado	1,00E-03	3
	6		1,00E-04	30		3		6,00E-03	3
	7		1,00E+00	1		4		5,00E-02	5
	8		1,00E+00	1		5		1,00E-02	3
	9		5,00E-01	5		6		1,00E-03	3
	10		1,00E-01	10		7		1,00E-01	5
	11		1,00E-02	10		9		1,00E-03	3
	12		1,00E-03	10		10		1,00E-02	3
	13		1,00E-04	30		11		5,00E-02	5
Tab. 20-2	1	Ações no nível de regra após diagnóstico (triagem)	5,00E-02	10	Tab. 20-11	1	Checagem de Mostradores	1,00E-03	3
	2		2,50E-02	10		2		1,00E-03	3
	3		1,00E+00	1		3		2,00E-03	3
Tab. 20-3	1	Diagnóstico em sala de controle	1,00E+00	1		4		3,00E-03	3
	2		1,00E-01	10	Tab. 20-12	5	Operação manual de controle	2,00E-03	3
	3		1,00E-02	10		6		6,00E-03	3
	4		1,00E-03	10		2		3,00E-03	3
	5		1,00E-04	30		3		1,00E-03	3
	6		4,00E-05	30		4		5,00E-04	10
	7		1,00E+00	1		5		5,00E-04	10
	8		1,00E+00	1		6		5,00E-02	5
	9		1,00E-01	10		7		5,00E-01	5
	10		1,00E-02	10		9		1,00E-03	10
	11		1,00E-03	10		10		3,00E-03	3
	12		1,00E-04	30		11		5,00E-03	3
	13		1,00E-05	30		12		3,00E-03	3
	14		1,00E+00	1		13		3,00E-03	3
	15		1,00E+00	1	Tab. 20-13	1	Seleção de válvulas operadas localmente	1,00E-03	3
	16		1,00E+00	1		2		3,00E-03	3
	17		1,00E-01	10		3		5,00E-03	3
	18		1,00E-02	10		4		8,00E-03	3
	19		1,00E-03	10		5		1,00E-02	3
	20		1,00E-04	30	Tab. 20-14	1	Detectar válvula emperrada	1,00E-03	3
	21		1,00E-05	30		2		2,00E-03	3
Tab. 20-5	1	Preparação de material escrito (omissão de item)	3,00E-02	5		3		5,00E-03	3
	2		1,00E-03	5		4		1,00E-02	3
	3		3,00E-02	5	Tab. 20-16	7a	Diagnóstico em planta nuclear	2,50E-01	5
	4		1,00E-03	5		7b		5,00E-01	10
Tab. 20-6	1	Falha em seguir procedimento administrativo	1,00E-02	5	Tab. 20-22	1	Verificação de tarefa realizada por terceiro	1,00E-01	5
	2		1,00E-03	3		2		2,00E-01	5
	3		1,00E-02	3		3		5,00E-02	5
	4		5,00E-03	10		4		1,00E-02	5
	5		1,00E-02	3		5		1,00E-01	5
	6		5,00E-02	5		6		5,00E-01	5
	7		3,00E-01	5		7		9,00E-01	5
	8		5,00E-01	5		8		5,00E-01	5
Tab. 20-7	1	Omissão de item de instrução (uso de material escrito)	1,00E-03	3		9		1,00E-03	5
	2		3,00E-03	3	Tab. 20-23	1	Iniciar a ação requerida por alarme	1,00E-04	10
	3		3,00E-03	3		2		6,00E-04	10
	4		1,00E-02	3		3		1,00E-03	10
	5		5,00E-02	5		4		2,00E-03	10
Tab. 20-8	1a	Lembrar itens de instrução oral.	1,00E-03	3		5		3,00E-03	10
	1b		1,00E-03	3		6		5,00E-03	10
	1c		1,00E-03	3		7		9,00E-03	10
	2a		3,00E-03	3		8		2,00E-02	10
	2b		4,00E-03	3		9		3,00E-02	10
	2c		6,00E-03	3		10		5,00E-02	10
	3a		1,00E-02	3		11		1,00E-01	10
	3b		2,00E-02	5		12		1,50E-01	10
	3c		3,00E-02	5		13		2,00E-01	10
	4a		3,00E-02	5		14		2,50E-01	10
	4b		4,00E-02	5	Tab. 20-24	1	Iniciar a ação requerida por indicador com legenda	1,00E-03	3
	4c		1,00E-01	5		2		9,50E-01	5
	5a		1,00E-01	5		3		9,00E-01	5
	5b		2,00E-01	5		4		9,50E-01	5
	5c		4,00E-01	5	Tab. 20-25	1a	Identificar um mostrador com desvio (verificação periódica)	5,00E-02	5
	6a		1,00E-03	3		1b		3,10E-01	5
	6b		1,00E-03	3		2a		1,50E-01	5
	6c		1,00E-03	3		2b		4,70E-01	5
	7a		6,00E-03	3		3a		1,00E-01	5
	7b		7,00E-03	3		3b		4,00E-01	5
	7c		1,00E-02	3		4a		3,00E-01	5
	8a		2,00E-02	5		4b		5,80E-01	5
	8b		3,00E-02	5		5a		9,00E-01	5
	8c		6,00E-02	5		5b		9,50E-01	5
	9a		6,00E-02	5		6a		9,80E-01	5
	9b		9,00E-02	5		6b		9,80E-01	5
	9c		2,00E-01	5		7a		9,90E-01	5
	10a		2,00E-01	5		7b		9,90E-01	5
	10b		3,00E-01	5					
	10c		7,00E-01	5					

Tab. 43 – Cruzamento entre ações no nível de regra e os erros de Reason

Fonte	Ação	Descrição	Código	Códigos											Observações (baseadas nas descrições das ações apresentadas nas fontes)
				EG 2a	EG 2b	EG 2c	EG 2d	EG 2e	EG 2f	EG 2g	EG 2h	EG 2i	EG 2j	EG 2k	
HEART	B	Conforme descrição na Tab. 37	H_B	X			X	X	X	X	X	X	X	X	1) Está sendo considerado que o procedimento é realizado raramente; 2) Considera-se que houve o aprendizado da regra; 3) Considera-se que o operador depende apenas de seus sentidos e de sua memória; 4) Considera-se que a regra adotada pode conter erros; 5) Considera-se que houve o aprendizado da regra; 6) Está sendo considerado que o operador não precisa de muitas informações.
	F		H_F				X	X	X	X	X				1) Está sendo considerado que o procedimento é realizado raramente; 2) Considera-se que houve o aprendizado da regra (há procedimento disponível); 3) Considera-se que o operador depende apenas de seus sentidos e de sua memória; 4) Desconsiderou-se o erro no procedimento; 5) Está sendo desconsiderada a necessidade de avaliação: deve-se utilizar o previsto no procedimento; 6) Está sendo considerado que o operador não precisa de muitas informações: o necessário está previsto no procedimento.
	G		H_G	X						X	X				1) Ação rotineira e muito praticada; 2) Ação bem projetada, não foi considerada a necessidade excessiva de informação; 3) Considera-se que houve o aprendizado da regra, mas que a falta de auxílio pode levar o operador a novas abordagens; 4) Considera-se que houve a necessidade de avaliação, em função da falta de auxílios; 5) Desconsiderou-se o erro no procedimento; 6) Considera-se que houve o aprendizado da regra.
	H		H_H	X						X	X				1) Não foi considerada a necessidade excessiva de informação; 2) Ação rotineira e muito praticada; 3) Considera-se que houve o aprendizado da regra, mas que por falta de supervisão ou de sinais adequados o indivíduo pode abandoná-la; 4) Considera-se que houve a necessidade de avaliação, em função da falta de equipamento para a interpretação; 5) Desconsiderou-se o erro no procedimento; 6) Considera-se que houve o aprendizado da regra.
INTENT	Consequência da Ação	1	I_1	X	X	X	X	X	X	X	X				8) 1) Como existe um grupo de erros tratando de procedimentos incorretos (dependência de recursos), este tipo de erro foi desconsiderado para a análise deste grupo.
		2	I_2	X	X	X	X	X	X	X	X				8) 1) Como existe um grupo de erros tratando de procedimentos incorretos (dependência de recursos), este tipo de erro foi desconsiderado para a análise deste grupo.
		3	I_3	X	X	X	X	X	X	X	X				5) 1) Não é considerada uma ação substituindo a prevista (em caso de variação excessiva). 2) Como existe um grupo de erros tratando de procedimentos incorretos (dependência de recursos), este tipo de erro foi desconsiderado para a análise deste grupo.
		4	I_4	X	X	X	X	X	X	X	X				5) 1) Não é considerada uma ação substituindo a prevista (em caso de variação excessiva). 2) Como existe um grupo de erros tratando de procedimentos incorretos (dependência de recursos), este tipo de erro foi desconsiderado para a análise deste grupo.
	Ações que levam à burla	5	I_5	X	X	X				X					4) 1) O indivíduo pode estar acostumado a uma situação específica que considera mais conveniente; 2) Como existe um grupo de erros tratando de procedimentos incorretos (dependência de recursos), este tipo de erro foi desconsiderado para a análise deste grupo; 3) A regra pode não ter sido aprendida adequadamente; 4) A regra pode não ser facilmente identificável; 5) Pode haver muita informação a ser avaliada.
		6	I_6	X	X					X					3) 1) O indivíduo pode estar acostumado com uma situação específica que considera mais conveniente; 2) Como existe um grupo de erros tratando de procedimentos incorretos (dependência de recursos), este tipo de erro foi desconsiderado para a análise deste grupo; 3) A regra pode não ter sido aprendida adequadamente; 4) A regra pode não ser facilmente identificável.
		7	I_7	X	X	X	X	X		X					6) 1) Como existe um grupo de erros tratando de procedimentos incorretos (dependência de recursos), este tipo de erro foi desconsiderado para a análise deste grupo; 2) A regra pode não ter sido aprendida adequadamente; 3) A regra pode não ser facilmente identificável; 4) Pode haver muita informação a ser avaliada.
		15	I_15	X						X	X	X	X	X	4) 1) Considera-se que houve o aprendizado da regra; 2) Não foi considerada a necessidade excessiva de informação; 3) A falta de auxílio pode levar o operador a novas abordagens; 4) Considera-se que houve a necessidade de avaliação, em função da falta de auxílios; 5) Considera-se que a regra pode ser desalinhada com a realidade do operador.
	Dependência de recursos	16	I_16	X	X	X				X	X	X	X	X	7) 1) Assume-se que a informação necessária esteve presente nos cenários de coleta de dados; 2) Está sendo assumido que a regra é correta, porém, desalinhada com a realidade do operador; 3) Assume-se que os dados utilizados no INTENT foram coletados entre operadores treinados.
		17	I_17	X	X					X	X	X	X	X	6) 1) Considerou-se que o foco do erro I_17 é o comunicador; 2) Considera-se que a informação inadequada não permite a identificação da regra correta; 3) Considera-se que a comunicação se assemelhou a um procedimento inadequado.
		18	I_18		X					X	X	X	X	X	4) 1) Considerou-se o erro no excesso característico da ação, não nas escolhas do operador; 2) Considera-se que o erro pode ser motivado por excesso de informação a ser ponderada; 3) Considerou-se que houve erro no planejamento da ação; 4) Não foram consideradas opções ao operador.
		20	I_20	X	X					X	X	X	X	X	6) 1) Considerou-se que o foco do erro I_20 é a informação; 2) Considera-se que a informação inadequada não permite a identificação da regra correta; 3) Considerou-se que ocorrem erros no procedimento disponível ao operador, mas que alternativas são apresentadas.
THERP	Tabela 20-5	1	T_5_1								X	X	X	X	3) 1) Considera-se apenas a chance de o procedimento estar inadequado.
		2	T_5_2								X	X	X	X	3) 1) Considera-se apenas a chance de o procedimento estar inadequado.
	Tabela 20-6	1	T_6_1			X	X	X	X	X	X				6) 1) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 2) Foram considerados operadores treinados; 3) Não são necessárias avaliações sensoriais.
		2	T_6_2			X	X	X	X	X	X				4) 1) Considera-se que a ação não é realizada raramente; 2) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 3) Foram considerados operadores treinados; 4) Não são necessárias avaliações sensoriais.
		3	T_6_3			X	X	X	X	X	X				4) 1) Considera-se que a ação não é realizada raramente; 2) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 3) Foram considerados operadores treinados; 4) Não são necessárias avaliações sensoriais.
		4	T_6_4			X	X	X	X	X	X				6) 1) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 2) Foram considerados operadores treinados; 3) Não são necessárias avaliações sensoriais.
		5	T_6_5			X	X	X	X	X	X				4) 1) Considera-se que a ação não é realizada raramente; 2) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 3) Foram considerados operadores treinados; 4) Não são necessárias avaliações sensoriais.
		6	T_6_6			X	X	X	X	X	X				6) 1) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 2) Foram considerados operadores treinados; 3) Não são necessárias avaliações sensoriais.
		7	T_6_7			X	X	X	X	X	X				6) 1) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 2) Foram considerados operadores treinados; 3) Não são necessárias avaliações sensoriais.
		8	T_6_8			X	X	X	X	X	X				4) 1) Considera-se que a ação não é realizada raramente; 2) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 3) Foram considerados operadores treinados; 4) Não são necessárias avaliações sensoriais.
	Tabela 20-7	1	T_7_1	X						X	X				3) 1) Ação não é realizada raramente; 2) Não considera muita informação; 3) Esta sendo considerado que as falhas nos procedimentos de execução sejam evidenciadas nos procedimentos de checagem; 4) Operadores treinados.
		2	T_7_2	X	X		X			X	X				5) 1) Ação não é realizada raramente; 2) Esta sendo considerado que as falhas nos procedimentos de execução sejam evidenciadas nos procedimentos de checagem; 3) Operadores treinados.
		3	T_7_3	X						X	X	X	X	X	6) 1) Ação não é realizada raramente; 2) Não considera muita informação; 3) Operadores treinados.
		4	T_7_4	X	X		X			X	X	X	X	X	8) 1) Ação não é realizada raramente; 2) Operadores treinados.

Tab. 43 – Cruzamento entre ações no nível de regra e os erros de Reason

Fonte	Ação		Descrição	Código	EG 2a	EG 2b	EG 2c	EG 2d	EG 2e	EG 2f	EG 2g	EG 2h	EG 2iH	EG 2iIH	I	Observações (baseadas nas descrições das ações apresentadas nas fontes)
Tabela 20-8		1a	Lembrar itens de instrução oral não escrita.	T_8_1a		X	X	X	X	X					4	1) Considera-se que a ação não é realizada raramente; 2) Erros nos procedimentos foram
		1b		T_8_1b		X	X	X	X	X					4	desconsiderados; 3) Foram considerados operadores treinados; 4) Não são necessárias
		1c		T_8_1c		X	X	X	X	X					4	avaliações sensoriais.
		2a		T_8_2a	X	X	X	X	X	X					6	1) Está sendo considerado que não houve aprendizado formal; 2) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 3) Foi considerada apenas a ação de lembrar.
		2b		T_8_2b	X	X	X	X	X	X					6	
		2c		T_8_2c	X	X	X	X	X	X					6	
		3a		T_8_3a	X	X	X	X	X	X					6	
		3b		T_8_3b	X	X	X	X	X	X					6	
		3c		T_8_3c	X	X	X	X	X	X					6	
		4a		T_8_4a	X	X	X	X	X	X					6	
		4b		T_8_4b	X	X	X	X	X	X					6	
		4c		T_8_4c	X	X	X	X	X	X					6	
		5a		T_8_5a	X	X	X	X	X	X					6	
		5b		T_8_5b	X	X	X	X	X	X					6	
		5c		T_8_5c	X	X	X	X	X	X					6	
		6a		T_8_6a		X	X	X	X	X					4	1) Considera-se que a ação não é realizada raramente; 2) Erros nos procedimentos foram desconsiderados; 3) Foram considerados operadores treinados; 4) Não são necessárias
		6b		T_8_6b		X	X	X	X	X					4	
		6c		T_8_6c		X	X	X	X	X					4	
Tabela 20-10		1	Ler e recordar informações de mostrador não anunciado	T_10_1		X	X		X	X					4	1) Apesar de ser possível o operador ignorar o conteúdo por se tratar de uma alteração não crível de estado da planta, a ação refere-se à leitura e à memorização da informação, não ao seu julgamento; 2) Trata-se de dispositivo comum; 3) Para o tipo de dispositivo considerado nesta ação, é necessária a decodificação e interpretação; 4) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 5) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 6) A ação se insere num contexto de leitura de grande quantidade de informação; 7) Por se tratar de erro de comissão, a omissão é considerada remota.
		2		T_10_2		X	X		X						3	1) Apesar de ser possível o operador ignorar o conteúdo por se tratar de uma alteração não crível de estado da planta, a ação refere-se à leitura e à memorização da informação, não ao seu julgamento; 2) Trata-se de dispositivo comum; 3) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 4) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 5) A ação se insere num contexto de leitura de grande quantidade de informação; 6) Por se tratar de erro de comissão, a omissão é considerada remota; 7) Não é necessária decodificação.
		3		T_10_3		X	X		X	X	X				5	1) Apesar de ser possível o operador ignorar o conteúdo por se tratar de uma alteração não crível de estado da planta, a ação refere-se à leitura e à memorização da informação, não ao seu julgamento; 2) O indivíduo tende a dar mais atenção a dispositivos que mudam com mais frequência que aos relativos a esta ação (focada em dispositivos de segurança); 3) Para o tipo de dispositivo considerado nesta ação, é necessária a decodificação e interpretação; 4) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 5) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 6) Por se tratar de erro de comissão, a omissão é considerada remota; 7) A ação, por definição, exige a leitura de grande quantidade de informação.
		4		T_10_4		X	X		X	X	X				5	
		5		T_10_5		X	X		X	X	X				5	1) Apesar de ser possível o operador ignorar o conteúdo por se tratar de uma alteração não crível de estado da planta, a ação refere-se à leitura e à memorização da informação, não ao seu julgamento; 2) A ação se insere num contexto de leitura de grande quantidade de informação; 3) Trata-se de dispositivo comum; 4) Para o tipo de dispositivo considerado nesta ação não é necessária a decodificação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução.
		6		T_10_6		X	X		X						3	1) Ação não é comum; 2) Ação concorre por atenção com muitas outras; 3) A ação se insere num contexto de leitura de grande quantidade de informação; 4) O indivíduo tende a dar mais atenção a eventos mais frequentes que estes; 5) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada na execução; 6) Trata de erro de comissão; 7) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados.
		7		T_10_7		X	X	X	X	X	X				7	1) O erro está ligado à leitura e à memorização da informação, não ao seu julgamento; 2) A ação se insere num contexto de leitura de grande quantidade de informação; 3) Trata-se de erro de comissão; 4) É necessária a decodificação e interpretação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução.
		10		T_10_10		X	X		X		X				4	1) Ação não é comum; 2) Ação concorre por atenção com muitas outras; 3) A ação se insere num contexto de leitura de grande quantidade de informação; 4) O indivíduo tende a dar mais atenção a eventos mais frequentes que estes; 5) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada na execução; 6) Trata-se de erro de comissão; 7) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados.
		11		T_10_11		X	X	X	X	X	X				7	1) O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra mais comum (e.g., as marcas mais comuns); 2) A informação sempre presente pode se referir aos diversos mostradores próximos; 3) O mais fácil entre as marcas difíceis e a regra de sucesso do passado; 4) Não é necessária a decodificação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 8) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.
Tabela 20-11		2	Checagem de Mostradores	T_11_2		X		X	X						3	1) Está sendo considerado que este mostrador é comum; 2) O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra geral; 3) O mais fácil entre as marcas difíceis e a regra de sucesso do passado; 4) Não é necessária a decodificação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 8) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.
		3		T_11_3		X	X	X	X	X					5	1) O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra mais comum (e.g., as marcas mais comuns); 2) A informação sempre presente pode se referir aos diversos mostradores próximos; 3) O mais fácil entre as marcas difíceis e a regra de sucesso do passado; 4) Não é necessária a decodificação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 8) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.
		4		T_11_4		X	X	X	X	X					5	1) O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra mais comum (e.g., as marcas mais comuns); 2) A informação sempre presente pode se referir aos diversos mostradores próximos; 3) O mais fácil entre as marcas difíceis e a regra de sucesso do passado; 4) Não é necessária a decodificação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 8) Por falta de informação, o operador pode ser obrigado a pesquisar outras referências.
		5		T_11_5		X	X	X	X	X					5	1) O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra mais comum (e.g., as marcas mais comuns); 2) A informação sempre presente pode se referir aos diversos mostradores próximos; 3) O mais fácil entre as marcas difíceis e a regra de sucesso do passado; 4) Não é necessária a decodificação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 8) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.

Tab. 43 – Cruzamento entre ações no nível de regra e os erros de Reason

Fonte	Ação	Descrição	Código	EG												Observações (baseadas nas descrições das ações apresentadas nas fontes)
				2a	2b	2c	2d	2e	2f	2g	2h	2i	2j	2k	2l	
Tabela 20-12	6	Operação manual de controle	T_11_6	X	X	X	X	X								1) O indivíduo ignora as marcas específicas e usa a regra mais comum (e.g., as marcas mais comuns); 2) A informação sempre presente pode se referir aos diversos mostradores próximos; 3) Está sendo considerada a regra mais comum para estes mostradores; 4) Não é necessária a decodificação; 5) Trata-se de erro de comissão; 6) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 7) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 8) Por falta de informação, o operador pode ser obrigado a pesquisar outras referências.
	5		T_12_5	X							X					1) Nesta ação, é considerada a situação mais comum; 2) Trata-se de erro de comissão (atuar controle manual), não são considerados erros de omissão; 3) Não é necessária a decodificação; 4) O projeto ruim está sendo assemelhado a uma regra errada; 5) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 6) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 7) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.
	6		T_12_6	X		X	X				X	X				1) Esta situação é considerada incomum; 2) Por se tratar de erro de comissão (atuar controle manual), não são considerados erros de omissão; 3) Está sendo considerada a necessidade de decodificação; 4) O projeto ruim está sendo assemelhado a uma regra errada; 5) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 6) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 7) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.
	7		T_12_7	X	X	X	X				X					1) Esta situação é considerada incomum; 2) Trata-se de erro de comissão (atuar controle manual), não são considerados erros de omissão; 3) Não é necessária a decodificação; 4) O projeto ruim está sendo assemelhado a uma regra errada; 5) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 6) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 7) O operador pode estar em um contexto em que há necessidade de interpretação de grande quantidade de informação.
	9		T_12_9	X							X					1) Nesta ação é considerada a situação mais comum; 2) Trata-se de erro de comissão (atuar controle manual), não são considerados erros de omissão; 3) Não é necessária a decodificação; 4) O projeto ruim está sendo assemelhado a uma regra errada; 5) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 6) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 7) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.
	10		T_12_10	X		X	X				X	X				1) Esta situação é considerada incomum; 2) Por se tratar de erro de comissão (atuar controle manual), não são considerados erros de omissão; 3) Está sendo considerada a necessidade de decodificação; 4) O projeto ruim está sendo assemelhado a uma regra errada; 5) Dados baseados em operadores exaustivamente treinados; 6) Mesmo com treinamento, a ação depende da atenção dada a sua execução; 7) A ação não depende da interpretação de grande quantidade de informação.
Tabela 20-14	1	Detectar válvula emperrada	T_14_1			X			X							1) O indivíduo pode crer que basta atuar até que a válvula ofereça resistência e ignorar esta possibilidade travar; 2) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 3) Estão sendo considerados operadores treinados.
	2		T_14_2	X		X			X	X						1) O indivíduo pode crer que basta atuar até que a válvula ofereça resistência e ignorar esta possibilidade travar; 2) O indivíduo pode não reconhecer a correlação entre a posição do eixo e a abertura da válvula; 3) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 4) Estão sendo considerados operadores treinados; 5) O marcador pode não seguir estereótipo.
	3		T_14_3	X		X			X	X						1) O indivíduo pode vir a crer que basta atuar até que a válvula ofereça resistência e ignorar esta possibilidade travar; 2) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 3) Estão sendo considerados operadores treinados; 4) O marcador pode não seguir estereótipo.
	4		T_14_4	X		X	X		X							1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
Tabela 20-22	1	Detectar erro na verificação de tarefa de terceiro	T_22_1	X	X		X		X	X						1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	2		T_22_2	X					X	X						1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	3		T_22_3	X					X	X						1) Ação não está sendo considerada de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	4		T_22_4	X	X	X	X	X	X	X						1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	5		T_22_5			X			X							1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	6		T_22_6	X		X			X	X						1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	7		T_22_7			X	X		X							1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	8		T_22_8	X					X	X						1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
	9		T_22_9	X	X		X		X	X						1) Ação de rotina; 2) Ação pode exigir o tratamento de muita informação; 3) Esta sendo considerada a tendência de o inspetor ter seu julgamento influenciado pelas características do operador; 4) Dependência intensiva dos sentidos; 5) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 6) Estão sendo considerados operadores treinados.
Tabela 20-23	1	Iniciar ação requerida por alarme	T_23_1	X	X	X	X	X	X	X						1) Nesta ação, a questão dos falsos positivos induzem o comportamento errôneo; 2) Pode haver necessidade de processamento de grande quantidade de informação; 3) Dependência intensiva dos sentidos; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados.
	2		T_23_2	X	X	X	X	X	X	X						
	3		T_23_3	X	X	X	X	X	X	X						
	4		T_23_4	X	X	X	X	X	X	X						
	5		T_23_5	X	X	X	X	X	X	X						
	6		T_23_6	X	X	X	X	X	X	X						
	7		T_23_7	X	X	X	X	X	X	X						
	8		T_23_8	X	X	X	X	X	X	X						
	9		T_23_9	X	X	X	X	X	X	X						
	10		T_23_10	X	X	X	X	X	X	X						
	11		T_23_11	X	X	X	X	X	X	X						
	12		T_23_12	X	X	X	X	X	X	X						
	13		T_23_13	X	X	X	X	X	X	X						
	14		T_23_14	X	X	X	X	X	X	X						

Tab. 43 – Cruzamento entre ações no nível de regra e os erros de Reason

Fonte	Ação		Descrição	Código	EG 2a	EG 2b	EG 2c	EG 2d	EG 2e	EG 2f	EG 2g	EG 2h	EG 2i	EG 2j	EG 2k	I	Observações (baseadas nas descrições das ações apresentadas nas fontes)			
Tabela 20-24		1	Iniciar ação requerida por indicador com legenda	T_24_2		X		X	X		X	X					5	1) Os operadores consideram que boa parte da informação apresentada por estes meios é de pouco impacto; 2) Foi considerado que indicador é prioridade no primeiro minuto; 3) Muita informação visual a ser analisada; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados.		
		2		T_24_3		X	X	X	X	X	X							7	1) Os operadores consideram que boa parte da informação apresentada por estes meios é de pouco impacto; 2) Muita informação visual a ser analisada; 3) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 4) Estão sendo considerados operadores treinados.	
		3		T_24_4		X	X	X	X	X	X	X							7	1) Os operadores consideram que boa parte da informação apresentada por estes meios é de pouco impacto; 2) Muita informação visual a ser analisada; 3) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 4) Estão sendo considerados operadores treinados.
		4		T_24_5		X	X	X	X	X	X	X							7	1) Os operadores consideram que boa parte da informação apresentada por estes meios é de pouco impacto; 2) Muita informação visual a ser analisada; 3) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 4) Estão sendo considerados operadores treinados.
Tabela 20-25		1a	Identificar um mostrador com desvio em verificação periódica	T_25_1a				X	X	X	X	X					5	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP (Nuclear Power Plant); 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.		
		1b		T_25_1b				X	X	X	X	X						5	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP (Nuclear Power Plant); 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		2a		T_25_2a		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		2b		T_25_2b		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		3a		T_25_3a				X	X	X	X	X						5	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		3b		T_25_3b				X	X	X	X	X						5	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		4a		T_25_4a		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		4b		T_25_4b		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		5a		T_25_5a		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		5b		T_25_5b		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		6a		T_25_6a		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
		6b		T_25_6b		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.	
7a	T_25_7a		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.				
7b	T_25_7b		X		X	X	X	X	X						6	1) Pode ser dada pouca importância para este tipo de instrumento - e.g., devido a falsos positivos; 2) São dispositivos preteridos em relação aos anunciados; 3) Muita informação semelhante nas NPP; 4) Está sendo considerado o uso de regra adequada; 5) Estão sendo considerados operadores treinados; 6) Confusão associada à falta de marcação; 7) Esta ação não se refere à execução ou a decisão, mas apenas à identificação.				

APÊNDICE C – VARIABILIDADE PARA OS ERROS DA TAB. 41

Este apêndice apresenta as distribuições para as variabilidades das probabilidades dos erros listados na Tab. 41. A Tab. 113 apresenta as variabilidades para os erros no nível de habilidade, a Tab. 114 apresenta as variabilidades para os erros no nível de regra, e a Tab. 115 apresenta as variabilidades para os erros no nível de habilidade, de acordo com os níveis de desempenho propostos no modelo SRK.

Tab. 113 – Variabilidade para os erros em ações no nível de habilidade

p	$P(p)$								p	$P(p)$							
	$EG\ 1a$	$EG\ 1b$	$EG\ 1c$	$EG\ 1d$	$EG\ 1e$	$EG\ 1f$	$EG\ 1g$	$EG\ 1h$		$EG\ 1a$	$EG\ 1b$	$EG\ 1c$	$EG\ 1d$	$EG\ 1e$	$EG\ 1f$	$EG\ 1g$	$EG\ 1h$
0,00E+00	9,96E-08	2,18E-08	3,52E-08	9,73E-08	9,80E-08	3,13E-08	5,33E-08	5,30E-08	1,00E-05	9,00E-03	2,32E-03	3,76E-03	8,76E-03	9,06E-03	3,34E-03	5,64E-03	5,81E-03
1,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	2,00E-05	1,44E-02	4,09E-03	6,66E-03	1,40E-02	1,47E-02	5,90E-03	9,87E-03	1,02E-02
2,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	3,00E-05	1,30E-02	3,97E-03	6,49E-03	1,26E-02	1,35E-02	5,74E-03	9,51E-03	9,79E-03
3,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	4,00E-05	1,20E-02	3,86E-03	6,33E-03	1,16E-02	1,25E-02	5,58E-03	9,17E-03	9,45E-03
4,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	5,00E-05	1,12E-02	3,76E-03	6,18E-03	1,07E-02	1,18E-02	5,44E-03	8,85E-03	9,12E-03
5,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	6,00E-05	1,05E-02	3,66E-03	6,04E-03	1,01E-02	1,11E-02	5,30E-03	8,56E-03	8,82E-03
6,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	7,00E-05	9,89E-03	3,57E-03	5,91E-03	9,48E-03	1,05E-02	5,17E-03	8,29E-03	8,54E-03
7,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	8,00E-05	9,39E-03	3,48E-03	5,78E-03	8,98E-03	1,00E-02	5,05E-03	8,03E-03	8,28E-03
8,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	9,00E-05	8,94E-03	3,40E-03	5,66E-03	8,54E-03	9,58E-03	4,93E-03	7,79E-03	8,03E-03
9,00E-10	1,99E-07	4,36E-08	7,03E-08	1,94E-07	1,96E-07	6,26E-08	1,07E-07	1,10E-07	1,00E-04	4,57E-02	1,82E-02	3,05E-02	4,36E-02	5,05E-02	2,65E-02	4,16E-02	4,29E-02
1,00E-09	1,10E-06	2,40E-07	3,87E-07	1,07E-06	1,08E-06	3,44E-07	5,88E-07	6,05E-07	2,00E-04	6,29E-02	2,72E-02	4,68E-02	5,96E-02	6,91E-02	3,97E-02	5,92E-02	6,08E-02
2,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	3,00E-04	5,08E-02	2,32E-02	4,09E-02	4,81E-02	5,53E-02	3,39E-02	4,90E-02	5,01E-02
3,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	4,00E-04	4,24E-02	2,03E-02	3,64E-02	4,02E-02	4,58E-02	2,96E-02	4,19E-02	4,26E-02
4,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	5,00E-04	3,60E-02	1,81E-02	3,28E-02	3,43E-02	3,87E-02	2,63E-02	3,67E-02	3,70E-02
5,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	6,00E-04	3,10E-02	1,63E-02	2,99E-02	2,98E-02	3,31E-02	2,36E-02	3,25E-02	3,27E-02
6,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	7,00E-04	2,70E-02	1,49E-02	2,73E-02	2,61E-02	2,87E-02	2,13E-02	2,91E-02	2,91E-02
7,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	8,00E-04	2,36E-02	1,37E-02	2,52E-02	2,31E-02	2,50E-02	1,95E-02	2,62E-02	2,61E-02
8,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	9,00E-04	2,08E-02	1,27E-02	2,32E-02	2,05E-02	2,19E-02	1,79E-02	2,37E-02	2,36E-02
9,00E-09	1,99E-06	4,36E-07	7,03E-07	1,94E-06	1,96E-06	6,26E-07	1,07E-06	1,10E-06	1,00E-03	8,60E-02	6,52E-02	1,15E-01	8,14E-02	1,06E-01	9,14E-02	1,18E-01	1,18E-01
1,00E-08	1,09E-05	2,40E-06	3,87E-06	1,07E-05	1,08E-05	3,44E-06	5,88E-06	6,05E-06	2,00E-03	7,70E-02	6,88E-02	1,02E-01	7,23E-02	8,50E-02	8,61E-02	9,49E-02	9,24E-02
2,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,95E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	3,00E-03	4,74E-02	5,04E-02	5,93E-02	4,23E-02	4,66E-02	5,57E-02	5,07E-02	4,90E-02
3,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,95E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	4,00E-03	3,36E-02	4,17E-02	3,90E-02	2,77E-02	2,93E-02	4,11E-02	3,13E-02	3,03E-02
4,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,95E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	5,00E-03	2,63E-02	3,66E-02	2,82E-02	1,99E-02	2,03E-02	3,29E-02	2,17E-02	2,11E-02
5,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,94E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	6,00E-03	2,19E-02	3,31E-02	2,19E-02	1,55E-02	1,51E-02	2,78E-02	1,63E-02	1,59E-02
6,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,94E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	7,00E-03	1,91E-02	3,05E-02	1,79E-02	1,28E-02	1,18E-02	2,43E-02	1,31E-02	1,28E-02
7,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,94E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	8,00E-03	1,71E-02	2,84E-02	1,53E-02	1,12E-02	9,70E-03	2,19E-02	1,09E-02	1,07E-02
8,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,94E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	9,00E-03	1,55E-02	2,66E-02	1,35E-02	1,01E-02	8,26E-03	2,00E-02	9,27E-03	9,18E-03
9,00E-08	1,99E-05	4,36E-06	7,03E-06	1,94E-05	1,96E-05	6,26E-06	1,07E-05	1,10E-05	1,00E-02	5,61E-02	1,23E-01	6,43E-02	4,01E-02	4,00E-02	1,02E-01	4,42E-02	4,42E-02
1,00E-07	1,09E-04	2,40E-05	3,87E-05	1,07E-04	1,08E-04	3,44E-05	5,87E-05	6,05E-05	2,00E-02	4,85E-02	1,11E-01	5,68E-02	3,82E-02	3,47E-02	9,03E-02	3,96E-02	3,96E-02
2,00E-07	1,98E-04	4,36E-05	7,03E-05	1,94E-04	1,95E-04	6,26E-05	1,07E-04	1,10E-04	3,00E-02	3,07E-02	5,04E-02	2,38E-02	4,90E-02	2,15E-02	2,66E-02	2,45E-02	2,45E-02
3,00E-07	1,98E-04	4,36E-05	7,03E-05	1,93E-04	1,95E-04	6,26E-05	1,07E-04	1,10E-04	4,00E-02	2,22E-02	3,41E-02	1,55E-02	4,02E-02	1,47E-02	1,57E-02	1,68E-02	1,68E-02
4,00E-07	1,97E-04	4,35E-05	7,03E-05	1,93E-04	1,94E-04	6,25E-05	1,07E-04	1,10E-04	5,00E-02	1,66E-02	2,51E-02	1,14E-02	3,15E-02	1,06E-02	1,13E-02	1,22E-02	1,22E-02
5,00E-07	1,97E-04	4,35E-05	7,03E-05	1,92E-04	1,94E-04	6,25E-05	1,07E-04	1,10E-04	6,00E-02	1,19E-02	1,83E-02	8,65E-03	2,30E-02	8,00E-03	8,50E-03	9,40E-03	9,40E-03
6,00E-07	1,97E-04	4,35E-05	7,02E-05	1,92E-04	1,94E-04	6,25E-05	1,07E-04	1,10E-04	7,00E-02	7,85E-03	1,29E-02	6,79E-03	1,53E-02	6,23E-03	6,62E-03	7,52E-03	7,52E-03
7,00E-07	1,96E-04	4,35E-05	7,02E-05	1,92E-04	1,93E-04	6,25E-05	1,07E-04	1,10E-04	8,00E-02	4,59E-03	8,64E-03	5,49E-03	8,96E-03	5,01E-03	5,32E-03	6,22E-03	6,22E-03
8,00E-07	1,96E-04	4,35E-05	7,02E-05	1,91E-04	1,93E-04	6,25E-05	1,07E-04	1,10E-04	9,00E-02	2,05E-03	5,41E-03	4,57E-03	3,94E-03	4,15E-03	4,41E-03	5,25E-03	5,25E-03
9,00E-07	1,95E-04	4,35E-05	7,02E-05	1,91E-04	1,92E-04	6,25E-05	1,06E-04	1,10E-04	1,00E-01	6,67E-05	1,59E-02	2,16E-02	1,29E-04	1,96E-02	2,08E-02	2,47E-02	2,47E-02
1,00E-06	1,07E-03	2,39E-04	3,86E-04	1,05E-03	1,06E-03	3,43E-04	5,85E-04	6,03E-04	2,00E-01	2,04E-07	7,81E-03	1,08E-02	1,81E-07	9,65E-03	1,03E-02	1,17E-02	1,17E-02
2,00E-06	1,90E-03	4,33E-04	7,00E-04	1,86E-03	1,88E-03	6,22E-04	1,06E-03	1,09E-03	3,00E-01	3,22E-08	2,75E-03	3,81E-03	3,11E-08	3,39E-03	3,61E-03	3,81E-03	3,81E-03
3,00E-06	1,86E-03	4,32E-04	6,98E-04	1,82E-03	1,84E-03	6,21E-04	1,06E-03	1,09E-03	4,00E-01	9,18E-09	1,05E-03	1,45E-03	9,11E-09	1,29E-03	1,37E-03	1,28E-03	1,28E-03
4,00E-06	1,83E-03	4,30E-04	6,96E-04	1,78E-03	1,81E-03	6,19E-04	1,05E-03	1,08E-03	5,00E-01	3,22E-09	3,97E-04	5,53E-04	3,21E-09	4,91E-04	5,21E-04	4,04E-04	4,04E-04
5,00E-06	1,79E-03	4,29E-04	6,94E-04	1,75E-03	1,78E-03	6,17E-04	1,05E-03	1,08E-03	6,00E-01	1,25E-09	1,42E-04	1,98E-04	1,25E-09	1,75E-04	1,86E-04	1,10E-04	1,10E-04
6,00E-06	1,76E-03	4,28E-04	6,92E-04	1,71E-03	1,75E-03	6,15E-04	1,04E-03	1,07E-03	7,00E-01	4,84E-10	4,40E-05	6,15E-05	4,84E-10	5,44E-05	5,78E-05	2,29E-05	2,29E-05
7,00E-06	1,73E-03	4,26E-04	6,90E-04	1,68E-03	1,72E-03	6,13E-04	1,04E-03	1,07E-03	8,00E-01	1,66E-10	1,03E-05	1,45E-05	1,66E-10	1,28E-05	1,36E-05	3,01E-06	3,01E-06
8,00E-06	1,70E-03	4,25E-04	6,88E-04	1,65E-03	1,70E-03	6,11E-04	1,03E-03	1,07E-03	9,00E-01	3,15E-11	1,30E-06	1,82E-06	3,15E-11	1,61E-06	1,71E-06	1,52E-07	1,52E-07
9,00E-06	1,67E-03	4,24E-04	6,86E-04	1,63E-03	1,67E-03	6,09E-04	1,03E-03	1,06E-03	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tab. 114 – Variabilidade para os tipos de erro em ações no nível de regra

P	P(p)										
	EG 2a	EG 2b	EG 2c	EG 2d	EG 2e	EG 2f	EG 2g	EG 2h	EG 2il	EG 2iil	EG 2iilI
0,00E+00	2,24E-07	6,00E-06	2,23E-07	1,88E-07	2,95E-07	2,12E-07	4,58E-06	5,99E-06	3,57E-08	3,61E-08	3,27E-08
1,00E-10	4,47E-07	1,19E-05	4,46E-07	3,76E-07	5,91E-07	4,23E-07	9,12E-06	1,19E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
2,00E-10	4,47E-07	1,19E-05	4,46E-07	3,76E-07	5,91E-07	4,23E-07	9,08E-06	1,19E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
3,00E-10	4,47E-07	1,18E-05	4,46E-07	3,76E-07	5,90E-07	4,23E-07	9,04E-06	1,18E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
4,00E-10	4,47E-07	1,18E-05	4,46E-07	3,76E-07	5,90E-07	4,23E-07	9,00E-06	1,18E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
5,00E-10	4,47E-07	1,17E-05	4,46E-07	3,76E-07	5,90E-07	4,23E-07	8,97E-06	1,17E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
6,00E-10	4,47E-07	1,17E-05	4,46E-07	3,76E-07	5,90E-07	4,23E-07	8,93E-06	1,17E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
7,00E-10	4,47E-07	1,16E-05	4,45E-07	3,76E-07	5,90E-07	4,23E-07	8,90E-06	1,16E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
8,00E-10	4,47E-07	1,16E-05	4,45E-07	3,76E-07	5,90E-07	4,23E-07	8,87E-06	1,16E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
9,00E-10	4,47E-07	1,16E-05	4,45E-07	3,76E-07	5,90E-07	4,22E-07	8,84E-06	1,15E-05	7,14E-08	7,22E-08	6,55E-08
1,00E-09	2,46E-06	6,34E-05	2,45E-06	2,07E-06	3,24E-06	2,32E-06	4,85E-05	6,33E-05	3,93E-07	3,97E-07	3,60E-07
2,00E-09	4,46E-06	1,12E-04	4,45E-06	3,75E-06	5,88E-06	4,22E-06	8,56E-05	1,12E-04	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
3,00E-09	4,45E-06	1,09E-04	4,44E-06	3,74E-06	5,87E-06	4,21E-06	8,53E-05	1,09E-04	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
4,00E-09	4,44E-06	1,07E-04	4,44E-06	3,74E-06	5,86E-06	4,20E-06	8,17E-05	1,07E-04	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
5,00E-09	4,43E-06	1,05E-04	4,43E-06	3,73E-06	5,85E-06	4,20E-06	8,01E-05	1,04E-04	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
6,00E-09	4,42E-06	1,03E-04	4,43E-06	3,73E-06	5,85E-06	4,19E-06	7,87E-05	1,03E-04	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
7,00E-09	4,41E-06	1,01E-04	4,42E-06	3,72E-06	5,84E-06	4,19E-06	7,73E-05	1,01E-04	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
8,00E-09	4,41E-06	9,93E-05	4,42E-06	3,72E-06	5,83E-06	4,18E-06	7,61E-05	9,91E-05	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
9,00E-09	4,40E-06	9,78E-05	4,41E-06	3,71E-06	5,82E-06	4,17E-06	7,49E-05	9,75E-05	7,14E-07	7,22E-07	6,55E-07
1,00E-08	2,42E-05	5,30E-04	2,42E-05	2,04E-05	3,20E-05	2,29E-05	4,06E-04	5,29E-04	3,93E-06	3,97E-06	3,60E-06
2,00E-08	4,33E-05	8,64E-04	4,36E-05	3,67E-05	5,74E-05	4,12E-05	6,64E-04	8,61E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
3,00E-08	4,28E-05	7,94E-04	4,33E-05	3,63E-05	5,67E-05	4,08E-05	6,11E-04	7,92E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
4,00E-08	4,24E-05	7,40E-04	4,29E-05	3,60E-05	5,62E-05	4,04E-05	5,71E-04	7,38E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
5,00E-08	4,20E-05	6,96E-04	4,26E-05	3,57E-05	5,57E-05	4,01E-05	5,38E-04	6,94E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
6,00E-08	4,16E-05	6,59E-04	4,23E-05	3,55E-05	5,52E-05	3,98E-05	5,10E-04	6,57E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
7,00E-08	4,12E-05	6,27E-04	4,21E-05	3,52E-05	5,48E-05	3,95E-05	4,86E-04	6,25E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
8,00E-08	4,09E-05	5,99E-04	4,18E-05	3,50E-05	5,44E-05	3,92E-05	4,65E-04	5,97E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
9,00E-08	4,06E-05	5,74E-04	4,16E-05	3,47E-05	5,40E-05	3,89E-05	4,45E-04	5,72E-04	7,14E-06	7,22E-06	6,55E-06
1,00E-07	2,22E-04	3,03E-03	2,27E-04	1,90E-04	2,95E-04	2,13E-04	2,35E-03	3,02E-03	3,93E-05	3,97E-05	3,60E-05
2,00E-07	3,81E-04	4,30E-03	3,94E-04	3,28E-04	5,07E-04	3,66E-04	3,36E-03	4,28E-03	7,14E-05	7,22E-05	6,54E-05
3,00E-07	3,65E-04	3,60E-03	3,79E-04	3,15E-04	4,85E-04	3,51E-04	2,84E-03	3,58E-03	7,14E-05	7,21E-05	6,54E-05
4,00E-07	3,52E-04	3,13E-03	3,67E-04	3,04E-04	4,68E-04	3,39E-04	2,48E-03	3,11E-03	7,14E-05	7,21E-05	6,54E-05
5,00E-07	3,41E-04	2,78E-03	3,56E-04	2,95E-04	4,54E-04	3,29E-04	2,21E-03	2,76E-03	7,14E-05	7,21E-05	6,54E-05
6,00E-07	3,32E-04	2,51E-03	3,47E-04	2,87E-04	4,41E-04	3,20E-04	2,00E-03	2,49E-03	7,13E-05	7,21E-05	6,54E-05
7,00E-07	3,24E-04	2,28E-03	3,39E-04	2,80E-04	4,30E-04	3,12E-04	1,83E-03	2,26E-03	7,13E-05	7,21E-05	6,54E-05
8,00E-07	3,17E-04	2,09E-03	3,32E-04	2,74E-04	4,20E-04	3,04E-04	1,69E-03	2,07E-03	7,13E-05	7,20E-05	6,53E-05
9,00E-07	3,11E-04	1,93E-03	3,25E-04	2,68E-04	4,11E-04	2,98E-04	1,56E-03	1,91E-03	7,13E-05	7,20E-05	6,53E-05
1,00E-06	1,68E-03	9,83E-03	1,75E-03	1,45E-03	2,22E-03	1,60E-03	8,00E-03	9,73E-03	3,92E-04	3,96E-04	3,59E-04
2,00E-06	2,64E-03	1,21E-02	2,75E-03	2,26E-03	3,45E-03	2,49E-03	1,01E-02	1,20E-02	7,10E-04	7,18E-04	6,51E-04
3,00E-06	2,39E-03	9,38E-03	2,48E-03	2,04E-03	3,11E-03	2,24E-03	7,93E-03	9,25E-03	7,07E-04	7,16E-04	6,49E-04
4,00E-06	2,22E-03	7,73E-03	2,30E-03	1,89E-03	2,87E-03	2,06E-03	6,62E-03	7,60E-03	7,04E-04	7,14E-04	6,47E-04
5,00E-06	2,09E-03	6,60E-03	2,16E-03	1,78E-03	2,69E-03	1,93E-03	5,73E-03	6,48E-03	7,01E-04	7,11E-04	6,46E-04
6,00E-06	1,99E-03	5,76E-03	2,05E-03	1,68E-03	2,54E-03	1,82E-03	5,06E-03	5,65E-03	6,98E-04	7,09E-04	6,44E-04
7,00E-06	1,90E-03	5,10E-03	1,96E-03	1,61E-03	2,42E-03	1,74E-03	4,54E-03	5,00E-03	6,95E-04	7,07E-04	6,42E-04
8,00E-06	1,83E-03	4,57E-03	1,88E-03	1,54E-03	2,32E-03	1,66E-03	4,11E-03	4,47E-03	6,91E-04	7,05E-04	6,40E-04
9,00E-06	1,76E-03	4,12E-03	1,82E-03	1,48E-03	2,23E-03	1,59E-03	3,75E-03	4,02E-03	6,88E-04	7,03E-04	6,38E-04
1,00E-05	9,35E-03	2,05E-02	9,65E-03	7,89E-03	1,18E-02	8,45E-03	1,89E-02	2,00E-02	3,71E-03	3,86E-03	3,50E-03
2,00E-05	1,34E-02	2,40E-02	1,39E-02	1,13E-02	1,66E-02	1,19E-02	2,30E-02	2,32E-02	6,36E-03	6,81E-03	6,18E-03
3,00E-05	1,15E-02	1,82E-02	1,20E-02	9,77E-03	1,41E-02	1,02E-02	1,80E-02	1,75E-02	6,05E-03	6,61E-03	6,00E-03
4,00E-05	1,03E-02	1,48E-02	1,08E-02	8,82E-03	1,25E-02	9,10E-03	1,51E-02	1,43E-02	5,79E-03	6,42E-03	5,83E-03
5,00E-05	9,51E-03	1,26E-02	9,98E-03	8,15E-03	1,14E-02	8,36E-03	1,31E-02	1,21E-02	5,55E-03	6,24E-03	5,67E-03
6,00E-05	8,86E-03	1,10E-02	9,32E-03	7,64E-03	1,06E-02	7,80E-03	1,17E-02	1,05E-02	5,34E-03	6,06E-03	5,51E-03
7,00E-05	8,33E-03	9,82E-03	8,78E-03	7,23E-03	9,93E-03	7,35E-03	1,06E-02	9,35E-03	5,15E-03	5,89E-03	5,36E-03
8,00E-05	7,88E-03	8,83E-03	8,32E-03	6,88E-03	9,35E-03	6,98E-03	9,64E-03	8,37E-03	4,97E-03	5,73E-03	5,21E-03
9,00E-05	7,50E-03	8,00E-03	7,92E-03	6,58E-03	8,86E-03	6,65E-03	8,87E-03	7,56E-03	4,81E-03	5,58E-03	5,07E-03
1,00E-04	3,94E-02	3,98E-02	4,16E-02	3,47E-02	4,63E-02	3,50E-02	4,51E-02	3,77E-02	2,38E-02	2,99E-02	2,72E-02
2,00E-04	5,14E-02	4,56E-02	5,29E-02	4,68E-02	5,80E-02	4,66E-02	5,36E-02	4,25E-02	3,33E-02	4,30E-02	3,90E-02
3,00E-04	4,12E-02	3,36E-02	4,07E-02	3,80E-02	4,47E-02	3,77E-02	4,00E-02	3,08E-02	2,70E-02	3,52E-02	3,18E-02
4,00E-04	3,47E-02	2,65E-02	3,29E-02	3,21E-02	3,63E-02	3,19E-02	3,18E-02	2,41E-02	2,26E-02	2,95E-02	2,66E-02
5,00E-04	3,01E-02	2,19E-02	2,75E-02	2,78E-02	3,04E-02	2,76E-02	2,62E-02	1,97E-02	1,94E-02	2,52E-02	2,27E-02
6,00E-04	2,66E-02	1,85E-02	2,36E-02	2,44E-02	2,61E-02	2,42E-02	2,21E-02	1,67E-02	1,69E-02	2,19E-02	1,96E-02
7,00E-04	2,38E-02	1,60E-02	2,06E-02	2,17E-02	2,27E-02	2,15E-02	1,90E-02	1,44E-02	1,49E-02	1,91E-02	1,71E-02
8,00E-04	2,16E-02	1,40E-02	1,83E-02	1,95E-02	2,00E-02	1,93E-02	1,66E-02	1,26E-02	1,33E-02	1,69E-02	1,50E-02
9,00E-04	1,96E-02	1,24E-02	1,65E-02	1,76E-02	1,78E-02	1,74E-02	1,47E-02	1,12E-02	1,20E-02	1,50E-02	1,33E-02
1,00E-03	9,91E-02	6,02E-02	8,26E-02	8,74E-02	8,82E-02	8,68E-02	7,17E-02	5,52E-02	5,51E-02	7,32E-02	6,50E-02
2,00E-03	9,31E-02	5,64E-02	7,83E-02	7,28E-02	6,83E-02	7,31E-02	6,07E-02	5,35E-02	5,38E-02	6,63E-02	6,00E-02
3,00E-03	5,88E-02	3,72E-02	5,10E-02	4,36E-02	3,88E-02	4,40E-02	3,71E-02	3,64E-02	3,82E-02	4,30E-02	4,01E-02
4,00E-03	4,12E-02	2,76E-02	3,70E-02	3,06E-02	2,62E-02	3,10E-02	2,62E-02	2,77E-02	3,09E-02	3,22E-02	3,11E-02
5,00E-03	3,09E-02	2,19E-02	2,87E-02	2,37E-02	1,98E-02	2,41E-02	2,02E-02	2,25E-02	2,68E-02	2,64E-02	2,62E-02
6,00E-03	2,43E-02	1,83E-02	2,33E-02	1,96E-02	1,61E-02	1,99E-02	1,64E-02	1,92E-02	2,40E-02	2,27E-02	2,31E-02
7,00E-03	1,98E-02	1,57E-02	1,97E-02	1,68E-02	1,37E-02	1,71E-02	1,38E-02	1,68E-02	2,21E-02	2,03E-02	2,09E-02
8,00E-03	1,66E-02	1,38E-02	1,70E-02	1,49E-02	1,21E-02	1,52E-02	1,19E-02	1,50E-02	2,05E-02	1,84E-02	1,93E-02
9,00E-03	1,41E-02	1,24E-02	1,50E-02	1,34E-02	1,09E-02	1,37E-02	1,05E-02	1,36E-02	1,92E-02	1,69E-02	1,79E-02
1,00E-02	6,68E-02	6,15E-02	7,38E-02	6,74E-02	5,45E-02	6,86E-02	5,19E-02	6,87E-02	9,83E-02	8,58E-02	9,20E-02
2,00E-02	4,63E-02	5,85E-02	5,82E-02	6,50E-02	5,38E-02</						

Tab. 115 – Variabilidade para os tipos de erro em ações no nível de conhecimento

P	P(p)															
	EG 3a	EG 3b	EG 3c	EG 3d	EG 3e	EG 3f	EG 3g	EG 3h	EG 3i	EG 3jI	EG 3jII	EG 3jIII	EG 3jIV	EG 3jV	EG 3jVI	
0.00E+00	1.80E-05	2.26E-05	1.80E-05	1.80E-05	1.80E-05	2.35E-05	1.80E-05	1.80E-05	2.35E-05	4.69E-05	2.35E-05	2.35E-05	3.13E-05	3.13E-05	3.13E-05	
1.00E-10	3.45E-05	4.32E-05	3.45E-05	3.45E-05	3.45E-05	4.50E-05	3.45E-05	3.45E-05	4.50E-05	8.99E-05	4.49E-05	4.49E-05	5.99E-05	6.00E-05	6.00E-05	
2.00E-10	3.35E-05	4.19E-05	3.35E-05	3.35E-05	3.35E-05	4.36E-05	3.35E-05	3.35E-05	4.36E-05	8.70E-05	4.35E-05	4.35E-05	5.80E-05	5.81E-05	5.81E-05	
3.00E-10	3.26E-05	4.07E-05	3.27E-05	3.26E-05	3.26E-05	4.24E-05	3.26E-05	3.26E-05	4.25E-05	8.48E-05	4.24E-05	4.24E-05	5.65E-05	5.66E-05	5.66E-05	
4.00E-10	3.19E-05	3.98E-05	3.19E-05	3.19E-05	3.19E-05	4.14E-05	3.19E-05	3.19E-05	4.15E-05	8.28E-05	4.14E-05	4.14E-05	5.52E-05	5.53E-05	5.53E-05	
5.00E-10	3.13E-05	3.89E-05	3.13E-05	3.13E-05	3.13E-05	4.06E-05	3.13E-05	3.13E-05	4.06E-05	8.11E-05	4.06E-05	4.06E-05	5.41E-05	5.41E-05	5.41E-05	
6.00E-10	3.07E-05	3.82E-05	3.08E-05	3.07E-05	3.07E-05	3.98E-05	3.07E-05	3.07E-05	3.99E-05	7.95E-05	3.98E-05	3.98E-05	5.30E-05	5.31E-05	5.31E-05	
7.00E-10	3.02E-05	3.75E-05	3.02E-05	3.02E-05	3.02E-05	3.91E-05	3.02E-05	3.02E-05	3.92E-05	7.82E-05	3.91E-05	3.91E-05	5.21E-05	5.22E-05	5.22E-05	
8.00E-10	2.98E-05	3.69E-05	2.98E-05	2.97E-05	2.98E-05	3.85E-05	2.98E-05	2.98E-05	3.85E-05	7.69E-05	3.85E-05	3.85E-05	5.13E-05	5.13E-05	5.13E-05	
9.00E-10	2.93E-05	3.63E-05	2.94E-05	2.93E-05	2.93E-05	3.79E-05	2.93E-05	2.93E-05	3.79E-05	7.57E-05	3.79E-05	3.79E-05	5.05E-05	5.05E-05	5.05E-05	
1.00E-09	1.59E-04	1.97E-04	1.59E-04	1.59E-04	1.59E-04	2.05E-04	1.59E-04	1.59E-04	2.06E-04	4.10E-04	2.05E-04	2.05E-04	2.74E-04	2.74E-04	2.74E-04	
2.00E-09	2.60E-04	3.18E-04	2.60E-04	2.59E-04	2.59E-04	3.33E-04	2.59E-04	2.59E-04	3.33E-04	6.65E-04	3.33E-04	3.33E-04	4.43E-04	4.44E-04	4.44E-04	
3.00E-09	2.39E-04	2.92E-04	2.40E-04	2.39E-04	2.39E-04	3.06E-04	2.39E-04	2.39E-04	3.06E-04	6.10E-04	3.05E-04	3.05E-04	4.07E-04	4.08E-04	4.08E-04	
4.00E-09	2.24E-04	2.72E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.85E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.85E-04	5.69E-04	2.85E-04	2.85E-04	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04	
5.00E-09	2.12E-04	2.56E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.68E-04	2.12E-04	2.12E-04	2.69E-04	5.36E-04	2.68E-04	2.68E-04	3.57E-04	3.58E-04	3.58E-04	
6.00E-09	2.01E-04	2.42E-04	2.02E-04	2.01E-04	2.01E-04	2.54E-04	2.01E-04	2.01E-04	2.55E-04	5.08E-04	2.54E-04	2.54E-04	3.39E-04	3.39E-04	3.39E-04	
7.00E-09	1.93E-04	2.31E-04	1.93E-04	1.92E-04	1.93E-04	2.42E-04	1.93E-04	1.93E-04	2.43E-04	4.84E-04	2.42E-04	2.42E-04	3.23E-04	3.24E-04	3.24E-04	
8.00E-09	1.85E-04	2.21E-04	1.85E-04	1.85E-04	1.85E-04	2.32E-04	1.85E-04	1.85E-04	2.33E-04	4.64E-04	2.32E-04	2.32E-04	3.09E-04	3.10E-04	3.10E-04	
9.00E-09	1.78E-04	2.12E-04	1.78E-04	1.78E-04	1.78E-04	2.23E-04	1.78E-04	1.78E-04	2.24E-04	4.46E-04	2.23E-04	2.23E-04	2.97E-04	2.98E-04	2.98E-04	
1.00E-08	9.47E-04	1.12E-03	9.48E-04	9.46E-04	9.46E-04	1.18E-03	9.47E-04	9.46E-04	1.19E-03	2.36E-03	1.18E-03	1.18E-03	1.58E-03	1.58E-03	1.58E-03	
2.00E-08	1.34E-03	1.56E-03	1.34E-03	1.34E-03	1.34E-03	1.64E-03	1.34E-03	1.34E-03	1.65E-03	3.28E-03	1.64E-03	1.64E-03	2.19E-03	2.19E-03	2.19E-03	
3.00E-08	1.13E-03	1.30E-03	1.13E-03	1.13E-03	1.13E-03	1.37E-03	1.13E-03	1.13E-03	1.38E-03	2.74E-03	1.37E-03	1.37E-03	1.83E-03	1.83E-03	1.83E-03	
4.00E-08	9.92E-04	1.13E-03	9.93E-04	9.89E-04	9.91E-04	1.19E-03	9.91E-04	9.91E-04	1.20E-03	2.37E-03	1.19E-03	1.19E-03	1.58E-03	1.59E-03	1.59E-03	
5.00E-08	8.89E-04	9.99E-04	8.90E-04	8.87E-04	8.88E-04	1.06E-03	8.89E-04	8.88E-04	1.06E-03	2.11E-03	1.06E-03	1.06E-03	1.41E-03	1.41E-03	1.41E-03	
6.00E-08	8.09E-04	9.02E-04	8.10E-04	8.07E-04	8.08E-04	9.55E-04	8.09E-04	8.08E-04	9.60E-04	1.90E-03	9.53E-04	9.53E-04	1.27E-03	1.28E-03	1.28E-03	
7.00E-08	7.45E-04	8.23E-04	7.46E-04	7.43E-04	7.43E-04	8.73E-04	7.44E-04	7.44E-04	8.78E-04	1.74E-03	8.71E-04	8.71E-04	1.16E-03	1.17E-03	1.17E-03	
8.00E-08	6.91E-04	7.59E-04	6.92E-04	6.89E-04	6.90E-04	8.05E-04	6.91E-04	6.90E-04	8.10E-04	1.60E-03	8.03E-04	8.03E-04	1.07E-03	1.08E-03	1.08E-03	
9.00E-08	6.47E-04	7.05E-04	6.48E-04	6.44E-04	6.45E-04	7.49E-04	6.46E-04	6.46E-04	7.53E-04	1.49E-03	7.46E-04	7.47E-04	9.95E-04	1.00E-03	1.00E-03	
1.00E-07	3.34E-03	3.63E-03	3.35E-03	3.33E-03	3.34E-03	3.85E-03	3.34E-03	3.34E-03	3.88E-03	7.67E-03	3.84E-03	3.84E-03	5.12E-03	5.15E-03	5.15E-03	
2.00E-07	3.97E-03	4.14E-03	3.98E-03	3.94E-03	3.95E-03	4.40E-03	3.96E-03	3.96E-03	4.44E-03	8.73E-03	4.38E-03	4.38E-03	5.84E-03	5.90E-03	5.90E-03	
3.00E-07	3.04E-03	3.11E-03	3.05E-03	3.02E-03	3.03E-03	3.30E-03	3.04E-03	3.03E-03	3.35E-03	6.54E-03	3.28E-03	3.28E-03	4.38E-03	4.44E-03	4.44E-03	
4.00E-07	2.50E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.48E-03	2.49E-03	2.67E-03	2.50E-03	2.49E-03	2.72E-03	5.27E-03	2.65E-03	2.65E-03	3.53E-03	3.59E-03	3.59E-03	
5.00E-07	2.13E-03	2.11E-03	2.14E-03	2.11E-03	2.12E-03	2.24E-03	2.13E-03	2.12E-03	2.29E-03	4.42E-03	2.22E-03	2.22E-03	2.96E-03	3.03E-03	3.03E-03	
6.00E-07	1.87E-03	1.82E-03	1.88E-03	1.84E-03	1.85E-03	1.94E-03	1.86E-03	1.86E-03	1.98E-03	3.81E-03	1.92E-03	1.92E-03	2.55E-03	2.62E-03	2.62E-03	
7.00E-07	1.66E-03	1.60E-03	1.67E-03	1.64E-03	1.65E-03	1.70E-03	1.66E-03	1.65E-03	1.75E-03	3.34E-03	1.68E-03	1.69E-03	2.25E-03	2.31E-03	2.31E-03	
8.00E-07	1.50E-03	1.43E-03	1.51E-03	1.48E-03	1.49E-03	1.52E-03	1.50E-03	1.49E-03	1.57E-03	2.98E-03	1.50E-03	1.50E-03	2.00E-03	2.06E-03	2.06E-03	
9.00E-07	1.37E-03	1.30E-03	1.38E-03	1.35E-03	1.36E-03	1.38E-03	1.37E-03	1.36E-03	1.42E-03	2.69E-03	1.36E-03	1.36E-03	1.81E-03	1.87E-03	1.87E-03	
1.00E-06	6.94E-03	6.51E-03	7.00E-03	6.81E-03	6.88E-03	6.92E-03	6.92E-03	6.89E-03	7.17E-03	1.35E-02	6.80E-03	6.81E-03	9.07E-03	9.41E-03	9.41E-03	
2.00E-06	7.23E-03	6.52E-03	7.33E-03	7.00E-03	7.11E-03	6.87E-03	7.19E-03	7.13E-03	7.32E-03	1.31E-02	6.66E-03	6.68E-03	8.89E-03	9.50E-03	9.50E-03	
3.00E-06	5.23E-03	4.68E-03	5.34E-03	5.01E-03	5.12E-03	4.90E-03	5.20E-03	5.14E-03	5.34E-03	9.16E-03	4.68E-03	4.71E-03	6.28E-03	6.86E-03	6.86E-03	
4.00E-06	4.17E-03	3.73E-03	4.28E-03	3.95E-03	4.06E-03	3.88E-03	4.14E-03	4.08E-03	4.32E-03	7.12E-03	3.67E-03	3.70E-03	4.90E-03	5.50E-03	5.50E-03	
5.00E-06	3.51E-03	3.13E-03	3.61E-03	3.28E-03	3.40E-03	3.24E-03	3.47E-03	3.41E-03	3.67E-03	5.84E-03	3.03E-03	3.06E-03	4.05E-03	4.64E-03	4.64E-03	
6.00E-06	3.04E-03	2.71E-03	3.15E-03	2.82E-03	2.94E-03	2.79E-03	3.01E-03	2.95E-03	3.22E-03	4.95E-03	2.58E-03	2.61E-03	3.46E-03	4.04E-03	4.04E-03	
7.00E-06	2.71E-03	2.41E-03	2.81E-03	2.49E-03	2.60E-03	2.46E-03	2.67E-03	2.62E-03	2.89E-03	4.30E-03	2.26E-03	2.28E-03	3.02E-03	3.60E-03	3.60E-03	
8.00E-06	2.45E-03	2.17E-03	2.55E-03	2.23E-03	2.34E-03	2.21E-03	2.41E-03	2.36E-03	2.63E-03	3.80E-03	2.01E-03	2.04E-03	2.69E-03	3.27E-03	3.27E-03	
9.00E-06	2.24E-03	1.99E-03	2.34E-03	2.03E-03	2.14E-03	2.01E-03	2.20E-03	2.15E-03	2.43E-03	3.41E-03	1.81E-03	1.84E-03	2.43E-03	3.00E-03	3.00E-03	
1.00E-05	1.14E-02	1.01E-02	1.19E-02	1.02E-02	1.08E-02	1.02E-02	1.12E-02	1.09E-02	1.25E-02	1.70E-02	9.08E-03	9.24E-03	1.22E-02	1.53E-02	1.53E-02	
2.00E-05	1.25E-02	1.14E-02	1.34E-02	1.06E-02	1.16E-02	1.10E-02	1.22E-02	1.17E-02	1.48E-02	1.63E-02	9.20E-03	9.48E-03	1.24E-02	1.77E-02	1.77E-02	
3.00E-05	9.56E-03	8.93E-03	1.04E-02	7.78E-03	8.78E-03	8.45E-03	9.20E-03	8.79E-03	1.20E-02	1.14E-02	6.72E-03	7.00E-03	9.08E-03	1.40E-02	1.40E-02	
4.00E-05	7.97E-03	7.61E-03	8.74E-03	6.31E-03	7.27E-03	7.06E-03	7.62E-03	7.24E-03	1.04E-02	8.84E-03	5.44E-03	5.71E-03	7.37E-03	1.20E-02	1.20E-02	
5.00E-05	6.95E-03	6.74E-03	7.67E-03	5.39E-03	6.31E-03	6.16E-03	6.60E-03	6.26E-03	9.26E-03	7.23E-03	4.62E-03	4.90E-03	6.28E-03	1.07E-02	1.07E-02	
6.00E-05	6.23E-03	6.11E-03	6.91E-03	4.76E-03	5.65E-03	5.51E-03	5.89E-03	5.57E-03	8.44E-03	6.11E-03	4.06E-03	4.33E-03	5.52E-03	9.69E-03	9.69E-03	
7.00E-05	5.69E-03	5.63E-03	6.33E-03	4.31E-03	5.16E-03	5.02E-03	5.36E-03	5.06E-03	7.79E-03	5.29E-03	3.64E-03	3.91E-03	4.96E-03	8.93E-03	8.93E-03	
8.00E-05	5.26E-03	5.25E-03	5.88E-03	3.96E-03	4.79E-03	4.63E-03	4.94E-03	4.66E-03	7.27E-03	4.66E-03	3.32E-03	3.59E-03	4.53E-03	8.32E-03	8.32E-03	
9.00E-05	4.92E-03	4.94E-03	5.50E-03	3.68E-03	4.48E-03	4.32E-03	4.60E-03	4.34E-03	6.83E-03	4.17E-03	3.06E-03	3.33E-03	4.19E-03	7.81E-03	7.81E-03	
1.00E-04	2.54E-02	2.57E-02	2.85E-02	1.90E-02	2.33E-02	2.23E-02	2.38E-02	2.24E-02	3.55E-02	2.08E-02	1.57E-02	1.72E-02	2.15E-02	4.06E-02	4.06	

Tab. 118 – Curvas de probabilidade para as HEP das ações no nível de conhecimento

[illegible]

APÊNDICE F – PROBABILIDADES PARA AS RB DOS EVENTOS #E2 E #E4

Para o cálculo de $P(\neg\#E2_REC)$, $P(\neg\#E2_IRR)$ e $P(\neg\#E4)$ foram elaboradas três RB. Em princípio, são apresentados os dados para a RB da Fig. 47 (da Tab. 120 à Tab. 129). Na sequência, a Fig. 68 apresenta a RB para o evento #E2 considerando a necessidade de resfriar apenas um compartimento da PEC seguida pela TPC para o nó “#E2” (Tab. 130) – as demais TPC são idênticas às homônimas apresentadas para a RB da Fig. 47. Por fim, a Fig. 69 apresenta a RB para o evento #E4 seguida pelas TPC que foram alteradas em relação à RB da Fig. 47 – as demais TPC são idênticas às apresentadas para a RB da Fig. 47.

Tab. 120 – Probabilidades para os nós raízes da RB para o evento #E2

Nó	Estados	Probabilidades	Justificativa	Nó	Estados	Probabilidades	Justificativa
Bomba B1A	Sucesso	9,94E-01	Vide Tab. 67	Painel 1	Sucesso	1-1,30E-05	Vide Tab. 67
	Falha na demanda	6,25E-03			Espírito	1,30E-05	
	Falha em 80 horas	2,75E-04			Sucesso	1-1,30E-05	
Bomba B1B (standby)	Sucesso	9,94E-01	Vide Tab. 67	Painel 2	Espírito	1,30E-05	Vide Tab. 67
	Falha na demanda	6,25E-03			Sucesso	1-4,37E-09	
	Sucesso	9,94E-01			FALHA_IRR	4,37E-09	
Bomba B2A	Sucesso	9,94E-01	Vide Tab. 67	Tubo*	Sucesso	1-1,58E-04	Vide Tab. 67
	Falha na demanda	6,25E-03			FALHA_IRR	1,58E-04	
	Falha em 80 horas	2,75E-04			Opera	1,00E00	
Bomba B2B (standby)	Sucesso	9,94E-01	Vide Tab. 67	Conexão*	Sucesso	1,00E00	Vide descrição da RB no item 2.1.4
	Falha na demanda	6,25E-03			FALHA_IRR	0,00E00	
	Falha em 80 horas	2,75E-04			Opera	1,00E00	
Trocador de Calor 1	Sucesso	1-2,76E-06	Vide Tab. 67	Sistema de Água de Resfriamento de Segurança	Opera	1,00E00	Vide descrição da RB no item 2.1.4
	Vazamento	1,38E-06			Não opera	0,00E00	
	Obstrução	1,38E-06			Energizado	1,00E00	
Trocador de Calor 2	Sucesso	1-2,76E-06	Vide Tab. 67	Sistema Elétrico	Desenergizado	0,00E00	Vide descrição da RB no item 2.1.4
	Vazamento	1,38E-06			Sucesso	1-2,00E-04	
	Obstrução	1,38E-06			Falha	1,94E-04	
Válvulas Fechadas	Sucesso	1-1,02E-05	No modo “D” (o mais crítico para este caso), a falha aberta de 9 válvulas (ou suas combinações) pode ser contornada com o realinhamento do sistema (vide Tab. 119).	Controlador	Espírito	6,40E-06	Vide Tab. 67
	Vazamento	1,02E-05			Sucesso	1-1,48E-04	
	Obstrução	1,81E-05			Falha	1,02E-04	
Válvulas Abertas	Sucesso	1-1,81E-05	No modo “D” (o mais crítico para este caso), a falha fechada de 16 válvulas (ou suas combinações) pode ser contornada com o realinhamento do sistema (vide Tab. 119).	Sensor e Mostrador B1 A	Espírito	4,64E-05	Vide Tab. 67
	Obstrução	1,81E-05			Sucesso	1-1,48E-04	
	Sucesso	1-1,13E-05			Falha	1,02E-04	
Válvulas Fechadas*	Sucesso	1-1,13E-05	No modo “C” (o mais crítico para este caso), a falha aberta de 10 válvulas (ou suas combinações) não pode ser contornada com o realinhamento do sistema (vide Tab. 119).	Sensor e Mostrador B1 B	Espírito	4,64E-05	Vide Tab. 67
	Vazamento_IRR	1,13E-05			Sucesso	1-1,48E-04	
	Obstrução_IRR	1,24E-05			Falha	1,02E-04	
Válvulas Abertas*	Sucesso	1-1,24E-05	No modo “E” (o mais crítico para este caso), a falha fechada de 11 válvulas (ou suas combinações) não pode ser contornada com o realinhamento do sistema (vide Tab. 119).	Sensor e Mostrador B2 A	Espírito	4,64E-05	Vide Tab. 67
	Obstrução_IRR	1,24E-05			Sucesso	1-1,48E-04	
	Sucesso	1-8,74E-09			Falha	1,02E-04	
Tubo	Obstrução	4,37E-09	Vide Tab. 67	Sensor e Mostrador B2 B	Espírito	4,64E-05	Vide Tab. 67
	Vazamento	4,37E-09			Sucesso	1-1,48E-04	
	Sucesso	1-3,16E-04			Falha	1,02E-04	
Conexão	Sucesso	1-3,16E-04	Vide Tab. 67		Espírito	4,64E-05	
	Obstrução	1,58E-04			Sucesso	1-1,48E-04	
	Vazamento	1,58E-04			Falha	1,02E-04	

Tab. 121 – TPC para o nó “Linhas” da RB para o evento #E2

Linhas	Tubo*	Conexão*	Tubo	Conexão	Linhas	Tubo*	Conexão*	Tubo	Conexão
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Obstrução	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Sucesso	Obstrução
Vazamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Sucesso	Vazamento
Obstrução	Sucesso	Sucesso	Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução	Sucesso
Obstrução	Sucesso	Sucesso	Obstrução	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução	Obstrução
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Sucesso	Obstrução	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução	Vazamento
Vazamento	Sucesso	Sucesso	Vazamento	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento	Sucesso
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Sucesso	Vazamento	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento	Obstrução
Vazamento	Sucesso	Sucesso	Vazamento	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento	Vazamento
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Sucesso	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Sucesso
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	Sucesso
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	Sucesso
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento

Tab. 122 – TPC para o nó “Sinal 2-1” da RB para o evento #E2

Sinal 2-1	Controlador	Sensor e Mostrador B1A	Sensor e Mostrador B1B
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Falha
Espúrio	Sucesso	Sucesso	Espúrio
Sucesso	Sucesso	Falha	Sucesso
Falha	Sucesso	Falha	Falha
Espúrio	Sucesso	Falha	Espúrio
Espúrio	Sucesso	Espúrio	Sucesso
Espúrio	Sucesso	Espúrio	Falha
Espúrio	Sucesso	Espúrio	Espúrio
Falha	Falha	Sucesso	Sucesso
Falha	Falha	Sucesso	Falha
Falha	Falha	Sucesso	Espúrio
Falha	Falha	Falha	Sucesso
Falha	Falha	Falha	Falha
Falha	Falha	Falha	Espúrio
Falha	Falha	Espúrio	Sucesso
Falha	Falha	Espúrio	Falha
Falha	Falha	Espúrio	Espúrio
Espúrio	Espúrio	Sucesso	Sucesso
Espúrio	Espúrio	Sucesso	Falha
Espúrio	Espúrio	Sucesso	Espúrio
Espúrio	Espúrio	Falha	Sucesso
Falha	Espúrio	Falha	Falha
Espúrio	Espúrio	Falha	Espúrio
Espúrio	Espúrio	Espúrio	Sucesso
Espúrio	Espúrio	Espúrio	Falha
Espúrio	Espúrio	Espúrio	Espúrio

Tab. 123 – TPC para o nó “Trocador de Calor” da RB para o evento #E2

Trocador de Calor	Trocador de Calor 1	Trocador de Calor 2
Sucesso	Sucesso	Sucesso
Vazamento	Sucesso	Vazamento
Obstrução	Sucesso	Obstrução
Vazamento	Vazamento	Sucesso
FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento
FALHA_IRR	Vazamento	Obstrução
Obstrução	Obstrução	Sucesso
FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento
FALHA_IRR	Obstrução	Obstrução

Tab. 124 – TPC para o nó “Sinal 2-2” da RB para o evento #E2

Sinal 2-2	Controlador	Sensor e Mostrador B2 A	Sensor e Mostrador B2 B
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Falha
Espúrio	Sucesso	Sucesso	Espúrio
Sucesso	Sucesso	Falha	Sucesso
Falha	Sucesso	Falha	Falha
Espúrio	Sucesso	Falha	Espúrio
Espúrio	Sucesso	Espúrio	Sucesso
Espúrio	Sucesso	Espúrio	Falha
Espúrio	Sucesso	Espúrio	Espúrio
Falha	Falha	Sucesso	Sucesso
Falha	Falha	Sucesso	Falha
Falha	Falha	Sucesso	Espúrio
Falha	Falha	Falha	Sucesso
Falha	Falha	Falha	Falha
Falha	Falha	Falha	Espúrio
Falha	Falha	Espúrio	Sucesso
Falha	Falha	Espúrio	Falha
Falha	Falha	Espúrio	Espúrio
Espúrio	Espúrio	Sucesso	Sucesso
Espúrio	Espúrio	Sucesso	Falha
Espúrio	Espúrio	Sucesso	Espúrio
Espúrio	Espúrio	Falha	Sucesso
Falha	Espúrio	Falha	Falha
Espúrio	Espúrio	Falha	Espúrio
Espúrio	Espúrio	Espúrio	Sucesso
Espúrio	Espúrio	Espúrio	Falha
Espúrio	Espúrio	Espúrio	Espúrio

Tab. 125 – TPC para o nó “Válvulas” da RB para o evento #E2

Válvulas	Válvulas Fechadas*	Válvulas Abertas*	Válvulas Abertas	Válvulas Fechadas
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Vazamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Vazamento
Obstrução	Sucesso	Sucesso	Obstrução	Sucesso
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Sucesso	Obstrução	Vazamento
FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução_IRR	Sucesso	Sucesso
FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução_IRR	Sucesso	Vazamento
FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução_IRR	Obstrução	Sucesso
FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução_IRR	Obstrução	Vazamento
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Sucesso	Sucesso	Sucesso
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Sucesso	Sucesso	Vazamento
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Sucesso	Obstrução	Sucesso
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Sucesso	Obstrução	Vazamento
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Obstrução_IRR	Sucesso	Sucesso
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Obstrução_IRR	Sucesso	Vazamento
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Obstrução_IRR	Obstrução	Sucesso
FALHA_IRR	Vazamento_IRR	Obstrução_IRR	Obstrução	Vazamento

Tab. 126 – TPC para o nó “Bombeamento 2” da RB para o evento #E2

[illegible]

Tab. 127 – TPC para o nó “Bombeamento 1” da RB para o evento #E2

[illegible]

Tab. 128 – TPC para o nó “Encaminhamento do Fluido” da RB para o evento #E2

Encaminhamento do Fluido	Trocador de Calor	Válvulas	Linhas	Encaminhamento do Fluido	Trocador de Calor	Válvulas	Linhas	Encaminhamento do Fluido	Trocador de Calor	Válvulas	Linhas
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento
Obstrução	Sucesso	Sucesso	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Vazamento	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR
Vazamento	Sucesso	Sucesso	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Obstrução	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Obstrução	Obstrução	FALHA_IRR	Obstrução	FALHA_IRR	Sucesso
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Obstrução	Vazamento	FALHA_IRR	Obstrução	FALHA_IRR	Obstrução
Vazamento	Sucesso	Vazamento	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	FALHA_IRR	Vazamento
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Vazamento	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Obstrução	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR
Vazamento	Sucesso	Vazamento	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Sucesso
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução
Obstrução	Sucesso	Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento
Obstrução	Sucesso	Obstrução	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Obstrução	Vazamento	FALHA_IRR	Vazamento	FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento e Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	FALHA_IRR	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	Sucesso
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Obstrução	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	Vazamento	FALHA_IRR	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	Obstrução
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Obstrução	FALHA_IRR	Vazamento	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	FALHA_IRR
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Vazamento	Obstrução	Obstrução	Sucesso	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento e Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	Obstrução	Obstrução	Sucesso	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	Sucesso
Vazamento e Obstrução	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Sucesso	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Sucesso	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	FALHA_IRR
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Vazamento	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento e Obstrução
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Vazamento	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Sucesso
FALHA_IRR	Sucesso	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Vazamento	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Obstrução
Vazamento	Vazamento	Sucesso	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Vazamento
Vazamento e Obstrução	Vazamento	Sucesso	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Vazamento	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR
Vazamento	Vazamento	Sucesso	Vazamento	Obstrução	Obstrução	Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução
FALHA_IRR	Vazamento	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Obstrução	Obstrução	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Sucesso
Vazamento e Obstrução	Vazamento	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Obstrução	Vazamento	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Obstrução
Vazamento	Vazamento	Vazamento	Sucesso	FALHA_IRR	Obstrução	Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento
Vazamento e Obstrução	Vazamento	Obstrução	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Obstrução	Vazamento e Obstrução	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR
Vazamento	Vazamento	Vazamento	Vazamento	Vazamento e Obstrução	Obstrução	Vazamento e Obstrução	Sucesso	FALHA_IRR	FALHA_IRR	FALHA_IRR	Vazamento e Obstrução

Tab. 129 – TPC para o nó “#E2” da RB para o evento #E2

[illegible]

Fig. 68 – Rede bayesiana para o evento #E2 (adaptada)

Tab. 130 – TPC para o nó “#E2” da RB para o evento #E2 (um compartimento)

#E2	SARS	Bombeamento 1	Encaminhamento do Fluido	SLP	#E2	SARS	Bombeamento 1	Encaminhamento do Fluido	SLP	#E2	SARS	Bombeamento 1	Encaminhamento do Fluido	SLP
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Sucesso	Opera	SUCESSO	Opera	Sucesso	Sucesso	Opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Sucesso	Opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Sucesso	Não opera	SUCESSO	Opera	Sucesso	Sucesso	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Sucesso	Não opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Obstrução	Opera	FALHA	Opera	Sucesso	Obstrução	Opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Obstrução	Opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Obstrução	Não opera	FALHA	Opera	Sucesso	Obstrução	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Obstrução	Não opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Vazamento	Opera	SUCESSO	Opera	Sucesso	Vazamento	Opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Vazamento	Opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Vazamento	Não opera	FALHA	Opera	Sucesso	Vazamento	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Vazamento	Não opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Opera	Sucesso	FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	FALHA IRR	Opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Opera	Sucesso	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	FALHA IRR	Não opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Vazamento e Obstrução	Opera	FALHA	Opera	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Vazamento e Obstrução	Opera
FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Vazamento e Obstrução	Não opera	FALHA	Opera	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Falha recuperável	Vazamento e Obstrução	Não opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Sucesso	Opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Sucesso	Opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Sucesso	Opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Sucesso	Não opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Sucesso	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Sucesso	Não opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Obstrução	Opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Obstrução	Opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Obstrução	Opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Obstrução	Não opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Obstrução	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Obstrução	Não opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Vazamento	Opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Vazamento	Opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Vazamento	Opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Vazamento	Não opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Vazamento	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Vazamento	Não opera
FALHA IRR	Opera	Falha recuperável	FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	FALHA IRR	Opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	FALHA IRR	Opera
FALHA IRR	Opera	Falha recuperável	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	FALHA IRR	Não opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Vazamento e Obstrução	Opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Vazamento e Obstrução	Opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Opera
FALHA	Opera	Falha recuperável	Vazamento e Obstrução	Não opera	FALHA IRR	Não opera	FALHA IRR	Vazamento e Obstrução	Não opera	FALHA IRR	Não opera	Sucesso	Vazamento e Obstrução	Não opera

Fig. 69 – Rede bayesiana para o evento #E4 (adaptada)

Tab. 131 – TPC para o nó “Bombeamento 1” da RB para o evento #E4

[illegible]

Tab. 132 – TPC para o nó “Bombeamento 2” da RB para o evento #E4

[illegible]

APÊNDICE G – PROBABILIDADES PARA A AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE

Apresentam-se neste apêndice as probabilidades e as TPC das RB das Figs. 49, 50, 52 e 53. Visto que estas RB são versões alteradas umas das outras – i.e., são formadas por muitos nós com características comuns –, este apêndice apresenta: 1) Todos os dados da RB da Fig. 49: a Tab. 133 apresenta as probabilidades para os nós pais sem TPC, e da Tab. 134 à Tab. 141 são apresentadas as TPC para os demais nós; 2) Os dados dos nós alterados e acrescentados na RB da Fig. 49 para a obtenção da RB na Fig. 50: a Tab. 142 apresenta os dados para os nós raízes acrescentados, e da Tab. 143 à Tab. 150 são apresentadas as TPC para os nós alterados; 3) Os dados dos nós acrescentados e alterados na RB da Fig. 50 para a obtenção da RB na Fig. 52: a Tab. 151 e a Tab. 152 apresentam os dados para os nós acrescentados; a Tab. 153 e a Tab. 154 apresentam os dados para os nós alterados; 4) Os dados do nó alterado e do nó acrescentado na RB da Fig. 52 para a obtenção da RB da Fig. 53: a Tab. 155 apresenta os dados para o nó acrescentado, e a Tab. 156 apresenta os dados para o nó alterado. É importante ressaltar que não houve a eliminação de nó entre as mudanças nas RB.

Tab. 133 – Probabilidades para os nós da RB na Fig. 49 que não apresentam TPC

Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades
E1	Sucesso	9,99E-01	A_C_3a_7	Sucesso	9,30E-01	A_C_5b	Sucesso	8,00E-01
	Fracasso	6,74E-04		Fracasso	7,00E-02		Fracasso	2,00E-01
E2	Sucesso	9,99E-01	A_C_3a_8	Sucesso	9,30E-01	A_C_5b_1	Sucesso	8,00E-01
	Fracasso REC	4,00E-04		Fracasso	7,00E-02		Fracasso	2,00E-01
E4	Fracasso IRR	2,62E-04	A_C_3a_9	Sucesso	9,30E-01	A_C_5b_2	Sucesso	8,00E-01
	Sucesso	9,99E-01		Fracasso	7,00E-02		Fracasso	2,00E-01
E3	Sucesso	1,13E-03	A_C_3b	Sucesso	9,10E-01	A_C_5a_4	Sucesso	9,00E-01
	Fracasso	0,999718		Fracasso	9,00E-02		Fracasso	1,00E-01
A_C_3a	Sucesso	2,82E-04	A_C_4a	Sucesso	9,60E-01	A_C_5a_5	Sucesso	9,00E-01
	Fracasso	9,30E-01		Fracasso	4,00E-02		Fracasso	1,00E-01
A_C_3a_1	Sucesso	7,00E-02	A_C_4a_1	Sucesso	9,60E-01	A_C_5a_6	Sucesso	9,00E-01
	Fracasso	9,30E-01		Fracasso	4,00E-02		Fracasso	1,00E-01
A_C_3a_2	Sucesso	7,00E-02	A_C_4a_2	Sucesso	9,60E-01	A_C_5a_7	Sucesso	9,00E-01
	Fracasso	9,30E-01		Fracasso	4,00E-02		Fracasso	1,00E-01
A_C_3a_3	Sucesso	9,30E-01	A_C_5a	Sucesso	9,00E-01	A_C_5a_8	Sucesso	9,00E-01
	Fracasso	7,00E-02		Fracasso	1,00E-01		Fracasso	1,00E-01
A_C_3a_4	Sucesso	9,30E-01	A_C_5a_1	Sucesso	9,00E-01	A_P_2	Sucesso	9,50E-01
	Fracasso	7,00E-02		Fracasso	1,00E-01		Fracasso	5,00E-02
A_C_3a_5	Sucesso	9,30E-01	A_C_5a_2	Sucesso	9,00E-01	A_P_2_1	Sucesso	9,50E-01
	Fracasso	7,00E-02		Fracasso	1,00E-01		Fracasso	5,00E-02
A_C_3a_6	Sucesso	9,30E-01	A_C_5a_3	Sucesso	9,00E-01	A_P_2_2	Sucesso	9,50E-01
	Fracasso	7,00E-02		Fracasso	1,00E-01		Fracasso	5,00E-02

Tab. 134 – TPC para o nó “D2” da RB na Fig. 49

D2	S15	S19d	S20d	S21d	S22d	S23d	S12	S13	S14
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Inadequado
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Inadequado	Adequado
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Inadequado	Inadequado
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Inadequado	Adequado	Adequado
Fracasso	Demais combinações								

Tab. 135 – TPC para os nós de atividade RB na Fig. 49

S2	A C 5a 1	S9	A C 5b 2	S17	A P 2 1	S25d	A C 3b
Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso
S3	A C 3a	S10	A P 2	S19d	A C 5a 8	S26d	A C 3a 5
Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso
S4	A C 5a 2	S11	A C 5a 3	S20d	A C 4a	S27d	A C 3a 6
Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso
S5	A C 3a 1	S12	A C 5a 4	S21d	A C 4a 1	S28d	A C 3a 7
Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso
S6	A C 3a 8	S13	A C 5a 5	S22d	A C 4a 2	S29d	A P 2 2
Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso
S7	A C 3a 3	S14	A C 5a 6	S23d	A C 3a 9	S30d	A C 5a
Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso
S8	A C 3a 2	S15	A C 5a 7	S24d	A C 3a 4	S31d	A C 5b 1
Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso	Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso	Inadequado	Fracasso
S16	A C 5b						
Adequado	Sucesso						
Inadequado	Fracasso						

Tab. 136 – TPC para o nó “A1” da RB na Fig. 49

A1	S3	S5	S7	S8
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
Fracasso	Demais combinações			

Tab. 137 – TPC para o nó “A2” da RB na Fig. 49

A2	S24d	S25d	S26d	S27d	S28d
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
Fracasso	Demais combinações				

Tab. 138 – TPC para o nó “M1” da RB na Fig. 49

M1	S10	S12	S16	S17
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
Fracasso	Demais combinações			

Tab. 139 – TPC para o nó “M2” da RB na Fig. 49

M2	S29d	S30d	S31d
Sucesso	Adequado	Adequado	Adequado
Fracasso	Demais combinações		

Tab. 140 – TPC para o nó “D1” da RB na Fig. 49

D1	S11	S6	S9	S2	S4
Sucesso	Adequado	Qualquer combinação			
Sucesso	Inadequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
Sucesso	Inadequado	Adequado	Adequado	Adequado	Inadequado
Sucesso	Inadequado	Adequado	Adequado	Inadequado	Adequado
Fracasso	Demais combinações				

Tab. 141 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 49

SRPEC	E1	D1	A1	M1	E2	D2	E3	A2	M2	E4
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação				
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Fracasso REC	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Sucesso	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação				
Sucesso	Sucesso	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Fracasso REC	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação				
Sucesso	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Fracasso REC	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Falha	Demais combinações									

Tab. 142 – Probabilidades para os nós da RB da Fig. 50 que não apresentam TPC

Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades
A_C_5b_3	Sucesso	0.8	A_C_5a_12	Sucesso	0.9
	Fracasso	0.2		Fracasso	0.1
A_C_5a_9	Sucesso	0.9	A_C_5a_13	Sucesso	0.9
	Fracasso	0.1		Fracasso	0.1
A_C_5a_10	Sucesso	0.9	A_C_5b_4	Sucesso	0.8
	Fracasso	0.1		Fracasso	0.2
A_C_5a_11	Sucesso	0.9	A_C_5a_15	Sucesso	0.9
	Fracasso	0.1		Fracasso	0.1

Tab. 143 – TPC para o nó “S3” da RB na Fig. 50

S3	A C 3a	A C 5a 9
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 144 – TPC para o nó “S5” da RB na Fig. 50

S5	A C 3a 1	A C 5a 10
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 145 – TPC para o nó “S8” da RB na Fig. 50

S8	A C 3a 2	A C 5a 12
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 146 – TPC para o nó “S7” da RB na Fig. 50

S7	A C 3a 3	A C 5a 11
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 147 – TPC para o nó “S17” da RB na Fig. 50

S17	A P 2 1	A C 5a 15
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 148 – TPC para o nó “S16” da RB na Fig. 50

S16	A C 5b	A C 5b 4
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 149 – TPC para o nó “S10” da RB na Fig. 50

S10	A P 2	A C 5a 13
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 150 – TPC para o nó “S11” da RB na Fig. 50

S11	A C 5a 3	A C 5b 3
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

Tab. 151 – Probabilidade para o nó “A_C_5a_16” da RB na Fig. 52

Nó	Estados	Probabilidades
A_C_5a_16	Sucesso	0.9
	Fracasso	0.1

Tab. 152 – TPC para o nó “S33” da RB na Fig. 52

S33	A C 5a 16
Adequado	Sucesso
Inadequado	Fracasso

Tab. 153 – TPC para o nó “M1” da RB na Fig. 52

<i>M1</i>	<i>S11</i>	<i>S33</i>	<i>S17</i>	<i>S10</i>	<i>S12</i>	<i>S16</i>
<i>Sucesso</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Qualquer combinação</i>		
<i>Fracasso</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Qualquer combinação</i>		
<i>Sucesso</i>	<i>Adequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>
<i>Fracasso</i>	<i>Adequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Demais combinações</i>		
<i>Sucesso</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Demais combinações</i>	
<i>Fracasso</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Demais combinações</i>		
<i>Sucesso</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>	<i>Adequado</i>
<i>Fracasso</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Inadequado</i>	<i>Demais combinações</i>		

Tab. 154 – TPC para o nó “A1” da RB na Fig. 52

A1	S11	S3	S5	S7	S8
Sucesso	Adequado	Qualquer combinação			
Sucesso	Inadequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
Fracasso	Inadequado	Demais combinações			

Tab. 155 – Probabilidade para o nó “A_C_5a_17” da RB na Fig. 53

Nó	Estados	Probabilidades
A_C_5a_17	Sucesso	0.9
	Fracasso	0.1

Tab. 156 – TPC para o nó de “S33” da RB na Fig. 53

S33	A C 5a 16	A C 5a 17
Inadequado	Fracasso	Fracasso
Adequado	Demais combinações	

APÊNDICE H – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 58

As probabilidades e os estados para os nós relacionados aos equipamentos (em laranja na RB da Fig. 58) estão apresentados na Tab. 157 – foram consideradas as taxas médias de falha apresentadas na Tab. 91 e o tempo de missão de 80 horas. As taxas de falha apresentadas na Tab. 91 foram consideradas indistintamente para os estado de falha destes equipamentos, i.e., neste modelo, a probabilidade de falha obtida é a mesma para dois modos de falha de dado equipamento (“Vazamento” e “Obstrução” para o nó “CN1_1”) – isto foi feito porque a AICHE (1989) não apresenta os dados em função dos modos de falha interessantes para este modelo (de forma que os resultados obtidos podem ser considerados conservadores). Para os equipamentos semelhantes em um mesmo circuito, foi considerada a probabilidade de falha de um ou mais equipamentos – estes equipamentos foram considerados em grupo. Em cada circuito (a RB da Fig. 58 considera dois circuitos, sendo modelada para o modo operacional “E”), como a distância entre os equipamentos é indefinida (i.e., sua distribuição física ainda não foi definida), foram considerados 5 mangotes para o agente MG1 (a jusante da bomba, quando este agente estiver presente), 36 conexões (18 a montante e 18 a jusante da bomba) para o agente CN1, e 9 trechos de tubulação de 10 metros para o agente TB1 para cada trecho (a montante da bomba ou a jusante da bomba). As TPC para os demais nós foram apresentadas nas tabelas seguintes. Os nós “Atividade1”, “SE”, “SARS” e “CICLO_1” não foram reproduzidos neste apêndice. Na RB, para os três primeiros, considerou-se a evidência de sucesso. Para o nó “CICLO_1” foi assumida uma distribuição uniforme – i.e., 25% de chance para cada estado (não há evidência de preponderância de um ou de outro estado).

Tab. 157 – Nós de equipamentos da RB da Fig. 58

Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades
CN1_1:	Sucesso	0,998352	VA1_1:	Sucesso	0,999976	TC1_1:	Sucesso	0,99504
	Vazamento	8,24E-04		Vazamento	1,22E-05		Vazamento	0,00248
	Obstrução	8,24E-04		Obstrução	1,22E-05		Obstrução	0,00248
CN1_2:	Sucesso	0,998352	VA1_2:	Sucesso	0,999976	TC1_2:	Sucesso	0,99504
	Vazamento	8,24E-04		Vazamento	1,22E-05		Vazamento	0,00248
	Obstrução	8,24E-04		Obstrução	1,22E-05		Obstrução	0,00248
TB1_1:	Sucesso	1	VA1_3:	Sucesso	0,999976	MO1_1:	Sucesso	0,99878
	Vazamento	1,10E-07		Vazamento	1,22E-05		Falha	0,00122
	Obstrução	1,10E-07		Obstrução	1,22E-05		Sucesso	0,99008
TB1_2:	Sucesso	1	VA1_4:	Sucesso	0,999976	BB1_1:	Falha	0,00992
	Vazamento	1,10E-07		Vazamento	1,22E-05		Sucesso	0,99878
	Obstrução	1,10E-07		Obstrução	1,22E-05		Falha	0,00122
MG1_1:	Sucesso	0,9996	MG1_2:	Sucesso	0,9996	BB1_2:	Sucesso	0,99008
	Vazamento	2,00E-04		Vazamento	2,00E-04		Falha	0,00992
	Obstrução	2,00E-04		Obstrução	2,00E-04		Sucesso	0,99986
BC1_1:	Sucesso	0,99171	BC1_2:	Sucesso	0,99171	P1_1:	Falha	1,40E-04
	Falha	0,00829		Falha	0,00829			

Tab. 158 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 58

SRPEC	Atividade13	Atividade12	Atividade6	Atividade7	Atividade1	Atividade17	Atividade14
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Falha resfriamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações		
Falha resfriamento e outras	Demais combinações						

Tab. 159 – TPC para o nó “Atividade6” da RB na Fig. 58

Atividade6	Circuito jusante da bomba 1	Circuito jusante da bomba 2	Circuito montante da bomba 1	Circuito montante da bomba 2
Sucesso	Integro	Integro	Qualquer combinação	
Fracasso	Demais combinações			

Tab. 160 – TPC para o nó “Atividade7” da RB na Fig. 58

Atividade7	Circuito_montante_da_bomba_1	Circuito_montante_da_bomba_2	Circuito_jusante_da_bomba_1	Circuito_jusante_da_bomba_2
Sucesso	Integro	Integro	Qualquer combinação	
Fracasso	Demais combinações			

Tab. 161 – TPC para o nó “Atividade12” da RB na Fig. 58

Atividade12	Encaminhamento 2	Encaminhamento 1	Atividade12	Encaminhamento 2	Encaminhamento 1
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Obstrução	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Mistura	Fracasso	Obstrução	Mistura
Sucesso	Sucesso	Obstrução	Sucesso	Obstrução	Obstrução
Fracasso	Sucesso	Mistura e Obstrução	Fracasso	Obstrução	Mistura e Obstrução
Fracasso	Mistura	Qualquer estado	Fracasso	Mistura e Obstrução	Qualquer estado

Tab. 162 – TPC para o nó “Bombeamento1” da RB na Fig. 58

Bombeamento 1	SE	PI 1	CICLO 1	BCI 1	MOI 1	BB1 1
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Sucesso	Qualquer estado	
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Falha	Qualquer estado	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Sucesso	Qualquer estado	
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Falha	Qualquer estado	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+MOI+BB1+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+MOI+BB1+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Qualquer combinação	Demais combinações	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+MOI+BB1+TCI+TBI+CNI+VAI$	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+MOI+BB1+TCI+TBI+CNI+VAI$	Qualquer combinação	Demais combinações	
Falha	Sucesso	Falha	Qualquer combinação			
Falha	Falha	Qualquer combinação				

Tab. 163 – TPC para o nó “Bombeamento2” da RB na Fig. 58

Tab. 103 - Tabela para o 1º Bombeamento2 da RE na Fig. 60						
Bombeamento2	SE	PI 1	CICLO 1	BCI 2	BBI 2	MOI 2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI	Sucesso	Qualquer combinação	
Falha	Sucesso	Sucesso	P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI	Falha	Qualquer combinação	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI	Sucesso	Qualquer combinação	
Falha	Sucesso	Sucesso	P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI	Falha	Qualquer combinação	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso
Falha	Sucesso	Sucesso	P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI	Qualquer combinação	Demais combinações	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso
Falha	Sucesso	Sucesso	P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação	Demais combinações	
Falha	Sucesso	Falha	Qualquer combinação			
Falha	Falha	Qualquer combinação				

Tab. 164 – TPC para o nó “Circuito montante da bomba 1” da RB na Fig. 58

Circuito montante da bomba 1	CICLO 1	TBI 1	CNI 1	MGI 1
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Sucesso	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Sucesso	Obstrução	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Obstrução	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Sucesso	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Sucesso	Obstrução	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Obstrução	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+BCI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Sucesso	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Sucesso	Obstrução	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Obstrução	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+MGI+VAI$	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Sucesso	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Sucesso	Obstrução	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Obstrução	Sucesso	Qualquer estado
Falha antes da bomba	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado
Integro	$P1+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI$	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado

Tab. 165 – TPC para o nó “Atividade13” da RB na Fig. 58

Atividade13	Circuito jusante da bomba 1	Circuito jusante da bomba 2	Circuito montante da bomba 1	Circuito montante da bomba 2
Sucesso	Integro	Integro	Qualquer combinação	
Fracasso	Demais combinações			

Tab. 166 – TPC para o nó “Atividade17” da RB na Fig. 58

<i>Atividade17</i>	<i>SARS</i>
<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>
<i>Fracasso</i>	<i>Falha</i>

Tab. 167 – TPC para o nó “Atividade14” da RB na Fig. 58

<i>Atividade14</i>	<i>Bombeamento2</i>	<i>Bombeamento1</i>	<i>Encaminhamento 1</i>	<i>Encaminhamento 2</i>
<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>
<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Mistura</i>
<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Mistura</i>	<i>Sucesso</i>
<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Mistura</i>	<i>Mistura</i>
<i>Fracasso</i>	<i>Demais combinações</i>			

Tab. 169 – TPC para o nó “Circuito montante da bomba 2” da RB na Fig. 58

Círculo montante da bomba 2	CICLO 1	CNI 2	TBI 2	MGI 2	Círculo montante da bomba 2	CICLO 1	CNI 2	TBI 2	MGI 2
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Successo	Successo	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Successo	Successo	Qualquer estado
Falha antes da bomba	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Successo	Vazamento	Qualquer estado	Falha antes da bomba	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Successo	Vazamento	Qualquer estado
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Successo	Obstrução	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Successo	Obstrução	Qualquer estado
Falha antes da bomba	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Vazamento	Qualquer combinação		Falha antes da bomba	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Obstrução	Successo	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Obstrução	Successo	Qualquer estado
Falha antes da bomba	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado	Falha antes da bomba	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+MGI+VAI	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+VAI	Successo	Successo	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+VAI	Successo	Successo	Qualquer estado
Falha antes da bomba	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+VAI	Successo	Vazamento	Qualquer estado	Falha antes da bomba	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+VAI	Successo	Vazamento	Qualquer estado
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+VAI	Successo	Obstrução	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+VAI	Successo	Obstrução	Qualquer estado
Falha antes da bomba	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+VAI	Vazamento	Qualquer combinação		Falha antes da bomba	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+VAI	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+VAI	Obstrução	Successo	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+VAI	Obstrução	Successo	Qualquer estado
Falha antes da bomba	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+VAI	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado	Falha antes da bomba	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+VAI	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado
Integro	P1+BC1+TC1+TBI+CNI+VAI	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado	Integro	P1+MOI+BB1+TC1+TBI+CNI+VAI	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado

avaliação da confiabilidade humana na concepção de sistemas complexos: desenvolvimento e aplicação da TECHR

Fig. 16 - 1º e 2º parafusos de fixação da bomba 1 da R2 na Fig. 05					Fig. 17 - 3º e 4º parafusos de fixação da bomba 2 da R2 na Fig. 05				
Circuito jussante da bomba 2	CICLO 1	TBI 2	CNI 2	MG1 2	Circuito jussante da bomba 2	CICLO 1	TBI 2	CNI 2	MG1 2
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso
Falha depois da bomba	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Sucesso	Vazamento	Falha depois da bomba	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Sucesso	Vazamento
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Sucesso	Obstrução	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Sucesso	Obstrução
Falha depois da bomba	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer combinação	Vazamento	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer combinação	Vazamento	Qualquer combinação
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Obstrução	Sucesso	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Obstrução	Sucesso
Falha depois da bomba	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Obstrução	Vazamento	Falha depois da bomba	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Obstrução	Vazamento
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Obstrução	Obstrução	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+MG1+VA1	Qualquer estado	Obstrução	Obstrução
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Falha depois da bomba	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Sucesso	Vazamento	Qualquer estado	Falha depois da bomba	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Sucesso	Vazamento	Qualquer estado
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Sucesso	Obstrução	Qualquer estado	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Sucesso	Obstrução	Qualquer estado
Falha depois da bomba	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Vazamento	Qualquer combinação		Falha depois da bomba	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Obstrução	Sucesso	Qualquer estado	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Obstrução	Sucesso	Qualquer estado
Falha depois da bomba	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado	Falha depois da bomba	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Obstrução	Vazamento	Qualquer estado
Integro	P1+BC1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado	Integro	P1+MO1+BB1+TC1+TBI1+CNI1+VA1	Obstrução	Obstrução	Qualquer estado

<i>TB1 1</i>	<i>CN1 1</i>	<i>MG1 1</i>	<i>Encaminhamento 1</i>	<i>CICLO 1</i>
<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	<i>Sucesso</i>	$P1+MO1+BR1+TC1+TB1+CN1+A$

Marcos Coelho Maturana

[illegible]

Tab. 172 – TPC para o nó “Encaminhamento 2” da RB na Fig. 58

[illegible]

APÊNDICE I – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 61

A RB apresentada na Fig. 61 possui alguns nós com TPC idênticas às TPC de nós correlatos apresentados na RB da Fig. 58 (Apêndice H). As TPC para estes nós não serão reproduzidas neste apêndice. A Tab. 173, no entanto, correlaciona estes nós às TPC apresentadas no Apêndice H.

Tab. 173 – Nós apresentados no Apêndice H

Nó	Referência no Apêndice H	Nó	Referência no Apêndice H
CN1_1	Tab. 157	VA1_2	Tab. 157
CN1_2	Tab. 157	VA1_3	Tab. 157
TB1_1	Tab. 157	VA1_4	Tab. 157
TB1_2	Tab. 157	Circuito montante da bomba 1	Tab. 164
MG1_1	Tab. 157	Circuito montante da bomba 2	Tab. 169
MG1_2	Tab. 157	Circuito jusante da bomba 1	Tab. 168
TC1_1	Tab. 157	Circuito jusante da bomba 2	Tab. 170
TC1_2	Tab. 157	Encaminhamento 1	Tab. 171
BC1_1	Tab. 157	Encaminhamento 2	Tab. 172
BC1_2	Tab. 157	Bombeamento 1	Tab. 162
PI_1	Tab. 157	Bombeamento 2	Tab. 163
BB1_1	Tab. 157	Atividade17	Tab. 166
BB1_2	Tab. 157	Atividade1	Primeiro parágrafo do Apêndice H
MO1_1	Tab. 157	SE	Primeiro parágrafo do Apêndice H
MO1_2	Tab. 157	SARS	Primeiro parágrafo do Apêndice H
VA1_1	Tab. 157	CICLO 2	Descrição do nó CICLO 1, no primeiro parágrafo do Apêndice H

As probabilidades e os estados para os nós relacionados aos equipamentos (em laranja na RB da Fig. 61) estão apresentados na Tab. 174 – para o circuito 3, foram consideradas as mesmas quantidades de conexões, tubulações e mangotes assumidas para os circuitos 1 e 2 (vide o Apêndice H). As TPC para os demais nós foram apresentadas nas tabelas seguintes. O nó “Atividade11” não foi apresentado neste apêndice – na RB, considerou-se a evidência de sucesso para este nó. As combinações consideradas impossíveis foram assinaladas com “x”. Nas combinações que incluem a falha do circuito 1 e do circuito 2, considerou-se a substituição do circuito 1 pelo circuito 3 (e.g., Tab. 188).

Tab. 174 – Nós de equipamentos da RB na Fig. 61

Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades
TB1_3	Sucesso	≈1	VA1_13	Sucesso	0,999976
	Vazamento	1,10E-07		Vazamento	1,22E-05
	Obstrução	1,10E-07		Obstrução	1,22E-05
MG1_3	Sucesso	0,9996	VA1_14	Sucesso	0,999976
	Vazamento	2,00E-04		Vazamento	1,22E-05
	Obstrução	2,00E-04		Obstrução	1,22E-05
CN1_3	Sucesso	0,998352	VA1_15	Sucesso	0,999976
	Vazamento	8,24E-04		Vazamento	1,22E-05
	Obstrução	8,24E-04		Obstrução	1,22E-05
TC1_3	Sucesso	0,99504	VA1_16	Sucesso	0,999976
	Vazamento	2,48E-03		Vazamento	1,22E-05
	Obstrução	2,48E-03		Obstrução	1,22E-05
VA1_11	Sucesso	0,999976	BC1_3	Sucesso	0,99171
	Vazamento	1,22E-05		Falha	8,29E-03
	Obstrução	1,22E-05		Sucesso	0,99878
VA1_12	Sucesso	0,999976	MO1_3	Falha	1,22E-03
	Vazamento	1,22E-05		Sucesso	0,99008
	Obstrução	1,22E-05		Falha	9,92E-03

Tab. 175 – TPC para o nó “CIRCUITO 1” da RB na Fig. 61

CIRCUITO 1	Bombeamento 1	Encaminhamento 1	Circuito jusante da bomba 1	Circuito montante da bomba 1
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Inteiro	Inteiro
Falha/troca*			Demais combinações	

*Indica a necessidade de troca do circuito 1 pelo circuito 3.

Tab. 176 – TPC para o nó “CIRCUITO_2” da RB na Fig. 61

CIRCUITO_2	Bombeamento_2	Encaminhamento_2	Circuito_jusante_da_bomba_2	Circuito_montante_da_bomba_2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro
Falha/troca*			Demais combinações	

0*Indica a necessidade de troca do circuito 2 pelo circuito 3.

Tab. 177 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 61

SRPEC	Atividade13	Atividade7	Atividade12	Atividade6	Atividade1	Atividade14	Atividade17
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Falhasrefriamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações	
Falhasrefriamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Fracasso	Qualquer combinação	
Falhasrefriamentoutras						Demais combinações	

Tab. 178 – TPC para o nó “Atividade15” da RB na Fig. 61

Atividade15	Atividade11
Sucesso	Sucesso
Fracasso	Fracasso

Tab. 179 – TPC para o nó “Atividade16” da RB na Fig. 61

Atividade16	Atividade11
Sucesso	Sucesso
Fracasso	Fracasso

Tab. 180 – TPC para o nó “Circuito_montante_da_bomba_3” da RB na Fig. 61

Circuito_montante_da_bomba_3	TBI_3	CNI_3	CICLO_1	MGI_3
Integro	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	
Falha depois da bomba	Sucesso	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	Sucesso	Obstrução	Qualquer combinação	
Falha depois da bomba	Vazamento		Qualquer combinação	
Integro	Obstrução	Sucesso	Qualquer combinação	
Falha depois da bomba	Obstrução	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	Obstrução	Obstrução	Qualquer combinação	

Tab. 181 – TPC para o nó “Circuito_jusante_da_bomba_3” da RB na Fig. 61

Circuito_jusante_da_bomba_3	TBI_3	CNI_3	CICLO_1	MGI_3
Integro	Qualquer estado	Sucesso	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Sucesso
Falha depois da bomba	Qualquer estado	Sucesso	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Vazamento
Integro	Qualquer estado	Sucesso	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Obstrução
Integro	Sucesso	Sucesso	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Falha depois da bomba	Vazamento	Sucesso	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Integro	Obstrução	Sucesso	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Integro	Qualquer estado	Sucesso	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Sucesso
Falha depois da bomba	Qualquer estado	Sucesso	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Vazamento
Integro	Qualquer estado	Sucesso	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Obstrução
Integro	Sucesso	Sucesso	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Falha depois da bomba	Vazamento	Sucesso	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Integro	Obstrução	Sucesso	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Falha depois da bomba	Qualquer combinação	Vazamento	Qualquer combinação	
Integro	Qualquer estado	Obstrução	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Sucesso
Falha depois da bomba	Qualquer estado	Obstrução	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Vazamento
Integro	Qualquer estado	Obstrução	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Obstrução
Integro	Sucesso	Obstrução	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Falha depois da bomba	Vazamento	Obstrução	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Integro	Obstrução	Obstrução	PI+BCI+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Integro	Qualquer estado	Obstrução	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Sucesso
Falha depois da bomba	Qualquer estado	Obstrução	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Vazamento
Integro	Qualquer estado	Obstrução	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+MGI+VAI	Obstrução
Integro	Sucesso	Obstrução	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Falha depois da bomba	Vazamento	Obstrução	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado
Integro	Obstrução	Obstrução	PI+MO1+BB1+TCI+TBI+CN1+VAI	Qualquer estado

Tab. 182 – TPC para o nó “Atividade6” da RB na Fig. 61

Atividade6	CIRCUITO_1	CIRCUITO_2	Circuito_jusante_da_bomba_1	Circuito_jusante_da_bomba_2	Atividade1	Atividade16	Atividade15	Circuito_jusante_da_bomba_3
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Sucesso		Qualquer combinação	
x	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Sucesso		Qualquer combinação
x	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer estado
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
x	Sucesso	Sucesso			Demais combinações			
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Falha depois da bomba
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Fracasso	Sucesso		Qualquer combinação
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer estado
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha depois da bomba	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha depois da bomba	Sucesso	Qualquer combinação		Falha depois da bomba
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha depois da bomba	Fracasso	Sucesso		Qualquer combinação
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer estado
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
x	Sucesso	Falha troca	Falha depois da bomba	Falha depois da bomba	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Falha depois da bomba	Falha depois da bomba	Fracasso	Sucesso		Qualquer estado
x	Sucesso	Falha troca	Falha depois da bomba	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Falha depois da bomba
x	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Fracasso	Sucesso		Qualquer combinação
x	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação
x	Falha troca	Sucesso	Qualquer combinação	Falha depois da bomba				Qualquer combinação
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Falha depois da bomba
x	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Integro	Fracasso	Sucesso		Qualquer combinação
x	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Falha depois da bomba	Sucesso			Qualquer combinação
x	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Falha depois da bomba	Fracasso	Sucesso		Qualquer combinação
x	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Falha depois da bomba	Falha depois da bomba	Sucesso			Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Falha depois da bomba	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
x	Falha troca	Falha troca	Falha depois da bomba	Falha depois da bomba	Fracasso			Demais combinações

Tab. 183 – TPC para o nó “Atividade13” da RB na Fig. 61

Atividade13	CIRCUITO 1	CIRCUITO 2	Circuito jussante da bomba 1	Circuito jussante da bomba 2	Atividade17	Atividade16	Atividade15	Circuito jussante da bomba 3
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		
x	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer estado
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
x	Sucesso	Sucesso	Demais combinações					
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Integro
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Falha depois da bomba
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Qualquer combinação	Sucesso	Fracasso	Qualquer combinação	
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Qualquer combinação	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Qualquer combinação	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
x	Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação					
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Qualquer combinação	Integro	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Integro
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Qualquer combinação	Integro	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Falha depois da bomba
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Qualquer combinação	Integro	Sucesso	Fracasso	Qualquer combinação	
x	Falha troca	Qualquer combinação	Qualquer combinação	Integro	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Falha troca	Qualquer combinação	Qualquer combinação	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação
x	Falha troca	Sucesso	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Qualquer combinação			
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Sucesso	Qualquer combinação		
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha depois da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação

Tab. 184 – TPC para o nó “Atividade7” da RB na Fig. 61

Aktividade	CIRCUITO_1	CIRCUITO_2	Circuito montante da bomba_1	Circuito montante da bomba_2	Atividade11	Atividade16	Atividade15	Circuito montante da bomba_3
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		
x	Sucesso		Integro	Integro	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer estado
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
x	Sucesso	Sucesso	Demais combinações					
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Falha antes da bomba
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer estado
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
Sucesso	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha antes da bomba	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha antes da bomba	Sucesso	Qualquer combinação		Falha antes da bomba
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha antes da bomba	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha antes da bomba	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer estado
Fracasso	Sucesso	Falha troca	Integro	Falha antes da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer estado
x	Sucesso	Falha troca	Falha antes da bomba		Qualquer combinação			
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Falha antes da bomba
x	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Integro	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação
x	Falha troca	Sucesso	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Qualquer combinação			
Sucesso	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Integro
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Integro	Sucesso	Qualquer combinação		Falha antes da bomba
x	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Integro	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Integro	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Integro	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Sucesso	Qualquer combinação		
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha antes da bomba	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação

Tab. 185 – TPC para o nó “Encaminhamento 3” da RB na Fig. 61

[illegible]

Tab. 185 – TPC para o nó “Encaminhamento 3” da RB na Fig. 61

[illegible]

Tab. 185 – TPC para o nó “Encaminhamento 3” da RB na Fig. 61

Encaminhamento	CICLO 2	MGI 3	CNI 3	TBI 3	VAI 11	VAI 14	TCI 3	VAI 12	VAI 13	VAI 15	VAI 16
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Qualquer combinação	Vazamento	Qualquer combinação			
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Sucesso	Qualquer combinação			Vazamento
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Sucesso	Qualquer combinação	Vazamento	Vazamento	Qualquer combinação
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Sucesso	Qualquer combinação	Vazamento	Qualquer combinação	
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Sucesso	Vazamento	Qualquer combinação		
Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Sucesso	Demais combinações			
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Vazamento	Qualquer combinação			
Mistura	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Demais combinações					Sucesso	Qualquer combinação			Vazamento
Mistura	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Demais combinações					Sucesso	Qualquer combinação	Vazamento	Vazamento	Qualquer combinação
Mistura	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Demais combinações					Sucesso	Qualquer combinação	Vazamento	Qualquer combinação	
Mistura	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Demais combinações					Sucesso	Vazamento	Qualquer combinação		
Successo	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Demais combinações					Sucesso	Demais combinações			
Mistura	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Demais combinações					Vazamento	Qualquer combinação			
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Obstrução	Qualquer combinação			Vazamento
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Obstrução	Qualquer combinação	Vazamento	Vazamento	Qualquer combinação
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Obstrução	Qualquer combinação	Vazamento	Qualquer combinação	
Mistura e Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Obstrução	Vazamento	Qualquer combinação		
Obstrução	PI+MOI+BBI+TCI+TBI+CNI+VAI	Qualquer combinação			Obstrução	Obstrução	Obstrução	Demais combinações			

Tab. 186 – TPC para o nó “Bombeamento3” da RB na Fig. 61

Bombeamento³	SE	PI 1	CICLO 2	BCI 3	BBI 3	MOI 3
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+BCI+TC1+TBI+CN1+MG1+VA1$	Sucesso	Qualquer estado	
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+BCI+TC1+TBI+CN1+MG1+VA1$	Falha	Qualquer estado	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+BC1+TC1+TBI+CN1+VA1$	Sucesso	Qualquer estado	
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+BC1+TC1+TBI+CN1+VA1$	Falha	Qualquer estado	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+MO1+BB1+TC1+TBI+CN1+MG1+VA1$	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+MO1+BB1+TC1+TBI+CN1+MG1+VA1$	Qualquer estado	Demais combinações	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	$P1+MO1+BB1+TC1+TBI+CN1+VA1$	Qualquer estado	Sucesso	Sucesso
Falha	Sucesso	Sucesso	$P1+MO1+BB1+TC1+TBI+CN1+VA1$	Qualquer estado	Demais combinações	
Falha	Sucesso	Falha	Qualquer combinação			
Falha	Falha	Qualquer combinação				

Tab. 187 – TPC para o nó “Atividade12” da RB na Fig. 61

[illegible]

Tab. 188 – TPC para o nó “Atividade14” da RB na Fig. 61

[illegible]

Tab. 188 – TPC para o nó “Atividade14” da RB na Fig. 61

Atividade14	CIRCUITO 1	CIRCUITO 2	Bombeamento1	Encaminhamento 1	Bombeamento2	Encaminhamento 2	Atividade11	Atividade15	Atividade16	Bombeamento3	Encaminhamento 3
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Falha	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Sucesso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Mistura
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura	Sucesso	Demais combinações			
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação		
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
Sucesso	Falha troca	Falha troca	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Mistura	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Sucesso	Falha troca	Falha troca	Sucesso	Mistura	Sucesso	Mistura	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Sucesso	Obstrução	Sucesso	Mistura	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Sucesso	Mistura e obstrução	Sucesso	Mistura	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Falha	Qualquer combinação	Sucesso	Mistura	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Obstrução	Sucesso	Qualquer combinação			
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Obstrução	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação		
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Obstrução	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Obstrução	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura e obstrução	Sucesso	Qualquer combinação			
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura e obstrução	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação		
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura e obstrução	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação		Sucesso	Mistura e obstrução	Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação				
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha	Qualquer combinação	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação			
x	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha	Qualquer combinação	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação			
Fracasso	Falha troca	Falha troca	Qualquer combinação	Falha	Qualquer combinação	Fracasso	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação		

APÊNDICE J – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 62

A RB apresentada na Fig. 62 possui alguns nós com TPC idênticas às TPC de nós correlatos apresentados na RB da Fig. 61 (Apêndice I). As TPC para estes nós não serão reproduzidas neste apêndice. A Tab. 189, no entanto, correlaciona estes nós às TPC apresentadas no Apêndice I.

Tab. 189 – Nós apresentados no Apêndice I

Nó	Referência no Apêndice I	Nó	Referência no Apêndice I	Nó	Referência no Apêndice I
Atividade1	Tab. 173	CNI 3	Tab. 174	PI 1	Tab. 173
Atividade12	Tab. 187	Circuito jusante da bomba 1	Tab. 173	SARS	Tab. 173
Atividade13	Tab. 183	Circuito jusante da bomba 2	Tab. 173	SE	Tab. 173
Atividade14	Tab. 188	Circuito jusante da bomba 3	Tab. 181	TBI 1	Tab. 173
Atividade15	Tab. 178	Circuito montante da bomba 1	Tab. 173	TBI 2	Tab. 173
Atividade16	Tab. 179	Circuito montante da bomba 2	Tab. 173	TBI 3	Tab. 174
Atividade17	Tab. 173	Circuito montante da bomba 3	Tab. 180	TCI 1	Tab. 173
Atividade6	Tab. 182	Encaminhamento 1	Tab. 173	TCI 2	Tab. 173
Atividade7	Tab. 184	Encaminhamento 2	Tab. 173	TCI 3	Tab. 174
BB1 1	Tab. 173	Encaminhamento 3	Tab. 185	VA1 1	Tab. 173
BB1 2	Tab. 173	Bombeamento 1	Tab. 173	VA1 11	Tab. 174
BB1 3	Tab. 174	Bombeamento 2	Tab. 173	VA1 12	Tab. 174
BC1 1	Tab. 173	Bombeamento 3	Tab. 186	VA1 13	Tab. 174
BC1 2	Tab. 173	MG1 1	Tab. 173	VA1 14	Tab. 174
BC1 3	Tab. 174	MG1 2	Tab. 173	VA1 15	Tab. 174
CICLO 2	Tab. 173	MG1 3	Tab. 174	VA1 16	Tab. 174
CIRCUITO 1	Tab. 175	MO1 1	Tab. 173	VA1 2	Tab. 173
CIRCUITO 2	Tab. 176	MO1 2	Tab. 173	VA1 3	Tab. 173
CNI 1	Tab. 173	MO1 3	Tab. 174	VA1 4	Tab. 173
CNI 2	Tab. 173				

As probabilidades e os estados para os nós relacionados aos equipamentos e ações humanas estão apresentados na Tab. 190. As TPC para os demais nós foram apresentadas nas tabelas seguintes. As combinações consideradas impossíveis foram assinaladas com “x”. A TPC para o nó “CICLO_3” não foi reproduzida neste apêndice – foi assumida uma distribuição uniforme, com 25% de chance para cada estado (não há evidência de preponderância de um ou de outro estado).

Tab. 190 – Nós de equipamentos e ações humanas da RB na Fig. 62

Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades
ST1_3	Sucesso	9,77E-01	CO1	Sucesso	9,84E-01	ST1_1	Sucesso	9,77E-01
	Falha	2,30E-02		Falha	1,64E-02		Falha	2,30E-02
ST1_4	Sucesso	9,77E-01	CC1_1	Sucesso	9,94E-01	A_C_5b_1	Sucesso	8,00E-01
	Falha	2,30E-02		Falha	5,91E-03		Erro	2,00E-01
A_C_5a_1	Sucesso	9,00E-01	CC1_2	Sucesso	9,94E-01	ST1_2	Sucesso	9,77E-01
	Erro	1,00E-01		Falha	5,91E-03		Falha	2,30E-02
A_C_5b	Sucesso	8,00E-01	ST3_2	Sucesso	9,99E-01	SA1_2	Sucesso	1,00E+00
	Erro	2,00E-01		Falha	5,70E-04		Falha	1,85E-04
A_C_5a	Sucesso	9,00E-01	ST3_1	Sucesso	9,99E-01	A_P_2	Sucesso	9,50E-01
	Erro	1,00E-01		Falha	5,70E-04		Erro	5,00E-02
SA1_1	Sucesso	1,00E+00	A_C_4a	Sucesso	9,60E-01			
	Falha	1,85E-04		Erro	4,00E-02			

Tab. 191 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 62

SRPEC	Atividade13	Atividade7	Atividade12	Atividade6	Atividade1	Atividade14	Atividade17	Atividade5	Atividade8	Atividade10
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Falha resfriamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso						
Falha resfriamento e outras										

Demais combinações

Demais combinações

Tab. 192 – TPC para o nó “Atividade10” da RB na Fig. 62

Tab. 152 – TFC para o 1º Atividade 10 da RB na Fig. 62								
Atividade10	Atividade5	Atividade8	CICLO_3	CO1	Atividade11A	CCI_1	CCI_2	A_P_2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Qualquer combinação				Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Qualquer combinação				Erro
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Qualquer combinação				Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Qualquer combinação				Erro
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Sucesso	Qualquer combinação			
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Falha	Sucesso	Qualquer combinação		
Fracasso	Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Falha	Fracasso	Qualquer combinação		
Sucesso	Sucesso	Sucesso	CC1	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação		
Sucesso	Sucesso	Sucesso	CC1	Qualquer combinação	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Sucesso	Sucesso	CC1	Qualquer combinação	Fracasso	Demais combinações		
Fracasso	Sucesso	Fracasso	Qualquer combinação					
x	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação					
Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação					

Tab. 193 – TPC para o nó “Atividade8” da RB na Fig. 62

Tab. 55 – H C para C 10 - Atividades da RE na Fig. 52									
Atividade8	Atividade5	CICLO_3	CO1	Atividade11A	CCI_1	CCI_2	A_C_5b	A_C_5b_1	
Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Qualquer combinação					Sucesso	
Fracasso	Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Qualquer combinação					Erro	
Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Qualquer combinação				Sucesso	Qualquer combinação	
Fracasso	Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Qualquer combinação				Erro	Qualquer combinação	
Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Sucesso	Qualquer combinação					
Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Falha	Sucesso	Qualquer combinação				
Fracasso	Sucesso	ST1 CO1	Falha	Fracasso	Qualquer combinação				
Sucesso	Sucesso	CC1	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação				
Sucesso	Sucesso	CC1	Qualquer combinação	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação		
Fracasso	Sucesso	CC1	Qualquer combinação	Fracasso	Demais combinações				
Fracasso	Fracasso		Qualquer combinação						

Tab. 194 – TPC para o nó “Atividade11A” da RB na Fig. 62

Atividade11A	A_C_5a_1	ST1_3	ST1_4
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Demais combinações		

Tab. 195 – TPC para o nó “Atividade5” da RB na Fig. 62

Atividade5	CICLO_3	Atividade11A	ST1_1	ST1_2	SA1_1	SA1_2	A_C_5a	CCI_1	CCI_2	CO1
Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Sucesso	Qualquer combinação				Sucesso	Qualquer combinação		
Fracasso	ST1 HE1 HE3 HE4	Sucesso	Qualquer combinação				Erro	Qualquer combinação		
Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação		Sucesso	Qualquer combinação		
Fracasso	ST1 HE1 HE3 HE4	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação		Erro	Qualquer combinação		
Fracasso	ST1 HE1 HE3 HE4	Demais combinações								
Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Sucesso	Qualquer combinação							
Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação			
Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações		Sucesso	Qualquer combinação		
Fracasso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações		Erro	Qualquer combinação		
Fracasso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Fracasso	Demais combinações							
Sucesso	ST1 CO1	Sucesso	Qualquer combinação							
Sucesso	ST1 CO1	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação				Sucesso	
Fracasso	ST1 CO1	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação				Falha	
Fracasso	ST1 CO1	Fracasso	Demais combinações							
Sucesso	CC1	Sucesso	Qualquer combinação							
Sucesso	CC1	Fracasso	Qualquer combinação					Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	CC1	Fracasso	Demais combinações							

Tab. 196 – TPC para o nó “Atividade9” da RB na Fig. 62

Tab. 156 - Tabela para as Atividades da RB na Fig. 62								
Atividade9	Atividade5	Atividade8	CICLO_3	CO1	CCI_1	CCI_2	Atividade11A	A_P_2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Qualquer combinação			Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 HE3 HE4	Qualquer combinação				Erro
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Qualquer combinação				Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	ST1 HE1 SA1 HE2 HE4	Qualquer combinação				Erro
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Qualquer combinação			Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Sucesso	Qualquer combinação		Fracasso	Qualquer combinação
Fracasso	Sucesso	Sucesso	ST1 CO1	Demais combinações				
Sucesso	Sucesso	Sucesso	CCI	Qualquer combinação			Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Sucesso	CCI	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Fracasso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Sucesso	CCI	Demais combinações				
Fracasso	Sucesso	Fracasso	Qualquer combinação					
x	Fracasso	Sucesso	Qualquer combinação					
Fracasso	Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação					

Tab. 197 – TPC para o nó “Atividade11B” da RB na Fig. 62

Atividade11B	A_C_4a	ST3_1	ST3_2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Demais combinações		

APÊNDICE K – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 63

Com exceção dos nós “ST1_5”, “ST1_6”, “A_C_5a_2”, “A_C_4a_1”, “Atividade11A” e “Atividade 11B”, os nós da RB apresentada na Fig. 63 possuem TPC idênticas às TPC de nós correlatos apresentados na RB da Fig. 62 (vide o Apêndice J). As TPC para estes nós não serão reproduzidas neste apêndice. As probabilidades para os nós “ST1_5”, “ST1_6”, “A_C_5a_2” e “A_C_4a_1” – que não apresentam nós pais – estão reproduzidas na Tab. 198. As TPC para os nós “Atividade11A” e “Atividade 11B” foram reproduzidas nas Tabs. 199 e 200.

Tab. 198 – Nós de equipamentos e ações humanas da RB na Fig. 63

Nó	Estados	Probabilidades
ST1_5	Sucesso	9,77E-01
	Falha	2,30E-02
ST1_6	Sucesso	9,77E-01
	Falha	2,30E-02
A_C_5a_2	Sucesso	9,00E-01
	Erro	1,00E-01
A_C_4a_1	Sucesso	8,00E-01
	Erro	4,00E-02
	Falha	1,85E-04

Tab. 199 –TPC para o nó “Atividade11A” da RB na Fig. 63

Atividade11A	A_C_5a_2	A_C_5a_1	ST1_3	ST1_5	ST1_4	ST1_6
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação		Falha	Falha
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Falha	Falha	Qualquer combinação	
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações			
Sucesso	Sucesso	Erro	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Erro	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação	Falha
Fracasso	Sucesso	Erro	Qualquer combinação	Falha	Qualquer combinação	
Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Erro	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Falha	Qualquer combinação
Fracasso	Erro	Sucesso	Falha	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação
Fracasso	Erro	Sucesso	Falha	Qualquer combinação	Falha	Qualquer combinação
Fracasso	Erro	Erro	Qualquer combinação			

Tab. 200 –TPC para o nó “Atividade11B” da RB na Fig. 63

Atividade11B	A_C_4a_1	A_C_4a	ST3_1	ST3_2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações	
Sucesso	Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Erro	Demais combinações	
Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Erro	Demais combinações		

APÊNDICE L – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 64

A RB apresentada na Fig. 64 possui alguns nós com TPC idênticas às TPC de nós correlatos apresentados na RB da Fig. 63 (Apêndice K). As TPC para estes nós não serão reproduzidas neste apêndice. A Tab. 173, no entanto, correlaciona estes nós às TPC apresentadas nos Apêndices I e J.

Tab. 201 – Nós apresentados nos Apêndices I e J

Nó	Referência nos Apêndices I e J	Nó	Referência nos Apêndices I e J	Nó	Referência nos Apêndices I e J
A_C_4a	Tab. 190	CICLO 3	Segundo parágrafo do Apêndice J	SAI 2	Tab. 190
A_C_4a_1*	Tab. 198	CIRCUITO 1	Tab. 189	SARS	Tab. 189
A_C_5a	Tab. 190	CIRCUITO 2	Tab. 189	SE	Tab. 189
A_C_5a_1	Tab. 190	Circuito jusante da bomba 1	Tab. 189	ST1 1	Tab. 190
A_C_5a_2*	Tab. 198	Circuito jusante da bomba 2	Tab. 189	ST1 2	Tab. 190
A_C_5b	Tab. 190	Circuito jusante da bomba 3	Tab. 189	PI 1	Tab. 189
A_C_5b_1	Tab. 190	Circuito montante da bomba 1	Tab. 189	SAI 1	Tab. 190
A_P_2	Tab. 190	Circuito montante da bomba 2	Tab. 189	CCI 1	Tab. 190
Atividade1	Tab. 189	Circuito montante da bomba 3	Tab. 189	CCI 2	Tab. 190
Atividade10	Tab. 192	CNI 1	Tab. 189	TBI 1	Tab. 189
Atividade12	Tab. 189	CNI 2	Tab. 189	TBI 2	Tab. 189
Atividade13	Tab. 189	CNI 3	Tab. 189	TBI 3	Tab. 189
Atividade14	Tab. 189	CO1	Tab. 190	TC1 1	Tab. 189
Atividade17	Tab. 189	Encaminhamento 1	Tab. 189	TC1 2	Tab. 189
Atividade5	Tab. 195	Encaminhamento 2	Tab. 189	TC1 3	Tab. 189
Atividade6	Tab. 189	Encaminhamento 3	Tab. 189	VAI 1	Tab. 189
Atividade7	Tab. 189	Bombeamento1	Tab. 189	VAI 11	Tab. 189
Atividade8	Tab. 193	Bombeamento2	Tab. 189	VAI 12	Tab. 189
Atividade9	Tab. 196	Bombeamento3	Tab. 189	VAI 13	Tab. 189
BB1 1	Tab. 189	MG1 1	Tab. 189	VAI 14	Tab. 189
BB1 2	Tab. 189	MG1 2	Tab. 189	VAI 15	Tab. 189
BB1 3	Tab. 189	MG1 3	Tab. 189	VAI 16	Tab. 189
BC1 1	Tab. 189	MO1 1	Tab. 189	VAI 2	Tab. 189
BC1 2	Tab. 189	MO1 2	Tab. 189	VAI 3	Tab. 189
BC1 3	Tab. 189	MO1 3	Tab. 189	VAI 4	Tab. 189
CICLO 2	Tab. 189				

*)*As TPC para estes nós foram apresentadas no Apêndice K.

As probabilidades e os estados para os nós relacionados aos equipamentos e ações humanas estão apresentados nas Tabs. 202, 203 e 204. As TPC para os demais nós foram apresentadas nas tabelas seguintes. As combinações consideradas impossíveis foram assinaladas com “x”.

Tab. 202 – Nós de equipamentos e ações humanas da RB na Fig. 64

Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades	Nó	Estados	Probabilidades
A_C_3a	Sucesso	9,30E-01	A_C_3a_8	Sucesso	9,30E-01	A_C_3a_5	Sucesso	9,30E-01
	Erro	7,00E-02		Erro	7,00E-02		Erro	7,00E-02
A_C_3a_1	Sucesso	9,30E-01	A_C_3a_6	Sucesso	9,30E-01	A_C_2f	Sucesso	9,40E-01
	Erro	7,00E-02		Erro	7,00E-02		Erro	6,00E-02
A_C_3a_2	Sucesso	9,30E-01	EsperaTB1	Sucesso	0,999964	A_C_2f_1	Sucesso	9,40E-01
	Erro	7,00E-02		Falha	3,55E-05		Erro	6,00E-02
A_C_3a_3	Sucesso	9,30E-01	EsperaTC1	Sucesso	4,47E-01	A_C_4a_2	Sucesso	9,60E-01
	Erro	7,00E-02		Falha	5,53E-01		Erro	4,00E-02
A_C_3a_4	Sucesso	9,30E-01	EsperaVA1	Sucesso	9,75E-01	EsperaCC1	Sucesso	5,27E-01
	Erro	7,00E-02		Falha	2,46E-02		Falha	4,73E-01
A_C_3a_9	Sucesso	9,30E-01	EsperaCN1	Sucesso	7,66E-01	EsperaP1	Sucesso	9,85E-01
	Erro	7,00E-02		Falha	2,34E-01		Falha	1,50E-02
A_C_3a_10	Sucesso	9,30E-01	A_C_5b_2	Sucesso	8,00E-01	EsperaBC1	Sucesso	6,70E-02
	Erro	7,00E-02		Erro	2,00E-01		Falha	9,33E-01
A_C_3a_7	Sucesso	9,30E-01						
	Erro	7,00E-02						

Tab. 203 – TPC para os nós “ST1_3”, “ST1_4”, “ST1_5” e “ST1_6” da RB na Fig. 64

Atividade4A	Estado	
	Sucesso	Fracasso
Sucesso	9,77E-01	2,30E-02
Fracasso	0,00E00	1,00E-01

Tab. 204 – TPC para os nós “ST3_1” e “ST3_2” da RB na Fig. 64

Atividade4B	Estado	
	Sucesso	Fracasso
Sucesso	9,99E-01	5,70E-04
Fracasso	0,00E00	1,00E-01

Tab. 205 – TPC para o nó “Atividade4F” da RB na Fig. 64

Atividade4F	A C 5b 2
Sucesso	Sucesso
Fracasso	Erro

Tab. 206 – TPC para o nó “Atividade4B” da RB na Fig. 64

Atividade4B	A C 2f 1
Sucesso	Sucesso
Fracasso	Erro

Tab. 207 – TPC para o nó “Atividade4A” da RB na Fig. 64

Atividade4A	A C 2f
Sucesso	Sucesso
Fracasso	Erro

Tab. 208 – TPC para o nó “Atividade4C” da RB na Fig. 64

Atividade4C	Atividade4A	ST1 4	ST1 3	EsperaP1	EsperaCC1	A C 4a 2
Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Erro
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações
x	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
x	Fracasso	Falha	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Fracasso	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Fracasso	Fracasso	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso	Demais combinações

Tab. 209 – TPC para o nó “Atividade4D” da RB na Fig. 64

Atividade4D	Atividade4B	ST3 1	ST3 2	EsperaP1	EsperaBC1	A C 3a 5
Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Erro
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações
x	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
x	Fracasso	Falha	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Fracasso	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Fracasso	Fracasso	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso	Demais combinações

Tab. 210 – TPC para o nó “Atividade4E” da RB na Fig. 64

Atividade4E	Atividade4B	ST3 1	ST3 2	EsperaVA1	EsperaTC1	EsperaTB1	EsperaCN1	A C 3a 6
Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Erro
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações
x	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
x	Fracasso	Falha	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Fracasso	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer estado
Fracasso	Fracasso	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações

Tab. 211 – TPC para o nó “Atividade3” da RB na Fig. 64

Atividade3	Atividade4F	A C 3a 2	A C 3a 3	A C 3a 4
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso

Tab. 212 – TPC para o nó “Atividade2” da RB na Fig. 64

Atividade2	Atividade4F	A C 3a	A C 3a 1
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Fracasso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Fracasso	Sucesso	Sucesso

Tab. 213 – TPC para o nó “Atividade4” da RB na Fig. 64

Atividade4	Atividade4F	Atividade4C	Atividade4D	Atividade4E
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Falha resf. e outras	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Falha resfriamento	Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso

Tab. 214 – TPC para o nó “Atividade11A” da RB na Fig. 64

Atividade11A	Atividade4A	ST1 3	ST1 5	ST1 4	ST1 6	A C 5a 1	A C 5a 2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação
Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Sucesso	Falha	Sucesso	Sucesso	Falha	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Fracasso	Falha	Falha	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso
x	Fracasso	Falha	Falha	Falha	Falha	Sucesso	Sucesso

Tab. 215 – TPC para o nó “Atividade11B” da RB na Fig. 64

Atividade11B	Atividade4B	A C 4a 1	A C 4a	ST3 1	ST3 2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso
Sucesso	Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso	Sucesso
x	Fracasso	Qualquer combinação	Sucesso	Sucesso	Sucesso
x	Fracasso	Qualquer combinação	Sucesso	Falha	Sucesso
x	Fracasso	Qualquer combinação	Falha	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	Falha	Falha	Sucesso

Tab. 216 – TPC para o nó “Atividade15” da RB na Fig. 64

Atividade15	Atividade11B	A_C_3a_7
Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Demais combinações	

Tab. 217 – TPC para o nó “Atividade16” da RB na Fig. 64

Atividade16	Atividade11B	A_C_3a_9	A_C_3a_10	A_C_3a_8
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Demais combinações			

Tab. 218 – TPC para o nó “SRPEC” da RB na Fig. 64

SRPEC	Atividade13	Atividade7	Atividade12	Atividade6	Atividade3	Atividade4	Atividade1	Atividade14	Atividade17	Atividade5	Atividade8	Atividade10	Atividade2
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Falha_resfriamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Demais combinações						
Falha_resfriamento	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Sucesso	Falha_resfriamento	Qualquer combinação						
Falha_resfriamento_e_outras	Demais combinações												

APÊNDICE M – PROBABILIDADES PARA A RB DA FIG. 65

Com exceção dos nós “A_C_4c”, “A_C_5b_3”, “Atividade4F”, “Atividade15” e “Atividade16”, os nós da RB apresentada na Fig. 65 possuem TPC idênticas às TPC de nós correlatos apresentados na RB da Fig. 64 (vide o Apêndice L). As TPC para estes nós não serão reproduzidas neste apêndice. As probabilidades para os nós “A_C_4c” e “A_C_5b_3” – que não apresentam nós pais – estão reproduzidas na Tab. 219. As TPC para os nós “Atividade4F”, “Atividade 15” e “Atividade 16” foram reproduzidas nas Tabs. 220, 221 e 222, respectivamente.

Tab. 219 – Nós de ações humanas da RB na Fig. 65

Nó	Estados	Probabilidades
A_C_5b_3:	Sucesso	0,8
	Erro	0,2
A_C_4c:	Sucesso	0,97
	Erro	0,03

Tab. 220 – TPC para o nó “Atividade4F” da RB na Fig. 65

Atividade4F	A_C_5b_2	A_C_4c
Fracasso	Erro	Erro
Sucesso	Demais combinações	

Tab. 221 – TPC para o nó “Atividade15” da RB na Fig. 65

Atividade15	Atividade11B	A_C_5b_3	A_C_3a_7
Fracasso	Sucesso	Erro	Erro
Sucesso	Sucesso	Demais combinações	
Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação	

Tab. 222 – TPC parcial para o nó “Atividade16” da RB na Fig. 65

Atividade16:	Atividade11B	A_C_5b_3	A_C_3a_9	A_C_3a_10	A_C_3a_8
Sucesso	Sucesso	Sucesso	Qualquer combinação		
Sucesso	Sucesso	Erro	Sucesso	Sucesso	Sucesso
Fracasso	Sucesso	Erro	Demais combinações		
Fracasso	Fracasso	Qualquer combinação			