ANDRE GUSTAVO RAMOS

**Análise de disponibilidade de um sistema de tratamento de gás
em instalações “offshore” utilizando redes de Petri estocásticas**

São Paulo
2018

ANDRE GUSTAVO RAMOS

**Análise de disponibilidade de um sistema de tratamento de gás
em instalações “offshore” utilizando redes de Petri estocásticas**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

São Paulo
2018

ANDRE GUSTAVO RAMOS

**Análise de disponibilidade de um sistema de tratamento de gás
em instalações “offshore” utilizando redes de Petri estocásticas**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto e
Fabricação

Orientador:
Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de
Souza

São Paulo
2018

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, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-Publicação

Ramos, André Gustavo

Análise de disponibilidade de um sistema de tratamento de gás em instalações “offshore” utilizando redes de Petri estocásticas / A. G. Ramos.-- versão corr. --São Paulo, 2018.

130 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Sistema de Processamento de Gás 2. Queima de Gás 3. Offshore 4. Confiabilidade 5. Disponibilidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Ana Paula Gonçalves Chaves, pelo apoio durante todo o trabalho e por compartilhar comigo o prazer em aprender.

Aos meus pais, Elezir Maria Woitikiw Ramos e Albino Ramos, e minha irmã, Maiara Ramos, por todo carinho e por compreenderem minha ausência por vezes necessária devido à dedicação ao mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, pela oportunidade de desenvolvimento desse trabalho, pela confiança e pelo conhecimento transmitido nas aulas e nas reuniões de seguimento.

Ao Prof. Dr. Fabrício Junqueira e ao Prof. Dr. Kazuo Nishimoto pelas sugestões e comentários que foram de grande valia para o desenvolvimento final do trabalho.

Ao colega Eng. Dr. Maurício Figueiredo de Oliveira pelo incentivo e apoio para a realização do mestrado, pelos conselhos compartilhados no âmbito acadêmico e profissional.

Aos demais colegas de trabalho pelas informações e conhecimentos compartilhados, acerca do universo de exploração e produção de petróleo, que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos outros professores, funcionários, colegas do Laboratório de Análise de Confiabilidade, amigos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

RAMOS, André Gustavo. **Análise de disponibilidade de um sistema de tratamento de gás em instalações “offshore” utilizando redes de Petri estocásticas**. 2018. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Numa unidade *offshore* de produção de petróleo, o gás produzido é tratado para atingir as especificações requeridas e permitir sua utilização em diferentes demandas como gás combustível, *gas lift*, exportação de gás ou injeção de gás. No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo regula a produção de óleo e gás, limita a queima de gás e controla a movimentação e utilização de gás de acordo com as estimativas informadas pelo operador. Falhas no sistema de tratamento de gás levam à queima e podem causar parada de produção. A confiabilidade e disponibilidade do sistema de tratamento de gás é uma preocupação relevante. Entender as relações e influências dos vários subsistemas e equipamentos do sistema nessas medidas de desempenho pode levar a melhorias nas estratégias de manutenção que podem minimizar perdas na produção de óleo e de gás. Dentre os vários métodos de análise de confiabilidade, as redes de Petri estocásticas se destacam quando comparadas às ferramentas tradicionais como diagrama de blocos ou árvore de falhas devido a sua habilidade em modelar aspectos como dependências funcionais, lógicas e sequências. Nesse trabalho foram construídos quatro modelos utilizando redes de Petri estocásticas para analisar a disponibilidade do sistema de tratamento de gás. A facilidade de construção modelo A sugere sua utilização em etapas preliminares de projeto para validar o arranjo inicial, as quantidades de equipamentos e as configurações de redundância. O modelo B pode ser utilizado para identificar os subsistemas e equipamentos que mais contribuem para as falhas do sistema e para realizar previsões quanto aos modos de operação do sistema e índice de aproveitamento de gás. A análise de sensibilidade dos resultados de disponibilidade quanto aos dados de falha utilizados mostrou que a variação do tempo médio para reparo tem maior influência. Por meio do modelo C verificou-se que uma plataforma operando num conjunto e sujeita a restrições de importação e exportação de gás tem maior indisponibilidade e maior probabilidade de falha do que uma plataforma operando isolada. O modelo D permite

concluir que a inclusão de um modo de falha ao modelo não implica em variação significativa dos resultados de confiabilidade e que nos resultados de disponibilidade a variação passa a ser significativa quando adotam-se pequenos valores de tempo médio entre falhas e grandes valores de tempo médio para reparo. A construção das redes de Petri estocásticas para o sistema completo exige uma compreensão detalhada do funcionamento do sistema em análise o que também pode ser destacado como uma vantagem das redes de Petri estocásticas, contribuindo para aquisição de conhecimento acerca do sistema e dando segurança quanto a fidelidade do modelo criado.

Palavras-chave: Sistema de Tratamento de Gás. Queima de Gás. Offshore. Confiabilidade. Disponibilidade. Rede de Petri estocástica.

ABSTRACT

RAMOS, André Gustavo. **Availability assessment of a gas treatment system in offshore installations using stochastic Petri nets**. 2018. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

In an offshore oil production facility, produced gas is treated to meet the necessary specifications to allow its use in different demands, as gas fuel, as exportation gas and as injection gas. In Brazil, the National Petroleum Agency regulates oil and gas production, establishing and gas flaring limits, the utilization and distribution of gas according to the operator's estimations. Failures in the gas treatment system eventually can cause oil production interruptions to avoid attaining the gas flaring limits. Reliability and availability of the gas treatment system is a major concern. Understanding the relationships and influences of the various gas treatment subsystems and equipment on these performance measures may lead to design or maintenance strategies improvements that could ultimately minimize oil and gas losses in the facility. Among several modelling methods stochastic Petri nets stands out comparing to traditional reliability tools like reliability block diagrams or fault tree analysis due to its ability to model aspects such as functional dependencies, logics and sequences. In this work, four models were built using stochastic Petri nets to assess the availability of a gas treatment system. The model A is easy to build and may be used in preliminary design stages to validate the initial arrangement, equipment and redundancies. The model B may be used to identify subsystems and equipment that most contribute to system failures and to predict operation modes and efficiency in the gas utilization. The sensibility analysis of reliability data has shown a predominant influence of the mean time to repair. Using model C, it could be noticed that a platform operating in a group submitted to injection and exportation gas limits has a greater unavailability and probability of failure than an isolated operating platform. Model D allow one to conclude that including a failure mode in the model does not imply in significant variation in the reliability results and that the variation is only significant in availability when using small mean time to failure values and large mean time to repair values. The stochastic Petri nets construction for the complete system requires an

accurate comprehension about the system operation what could also be mentioned as an advantage of the stochastic Petri nets.

Keywords: Gas treatment system. Flaring gas. Offshore. Reliability. Availability. Stochastic Petri Nets.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	OBJETIVO	12
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	SISTEMA DE TRATAMENTO DE GÁS.....	14
2.2	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE	18
2.2.1	<i>Definições</i>	<i>18</i>
2.2.2	<i>Confiabilidade e disponibilidade de sistemas</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Métodos de análise de confiabilidade e disponibilidade.....</i>	<i>24</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	MODELOS	35
3.2	DADOS DE FALHA	40
3.3	FERRAMENTA DE ANÁLISE.....	45
4	MODELO A	47
4.1	MODELO DE REDUNDÂNCIA STANDBY 1 DE 2	47
4.2	MODELO DE REDUNDÂNCIA STANDBY 2 DE 3	49
4.3	MODELO DO SISTEMA	50
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5	MODELO B	61
5.1	MODELO DO SISTEMA	61
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.2.1	<i>Índice de utilização de gás.....</i>	<i>79</i>
6	MODELO C	82
6.1	MODELO	82
6.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
7	MODELO D	91
7.1	MODELO	91
7.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93

8 CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS	101
APÊNDICE A – MODELO B: RDPE PARA OS SUBSISTEMAS	105
APÊNDICE B – MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS.....	110
APÊNDICE C – MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS.....	124
APÊNDICE D – MODELO D: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS.....	128

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - ESQUEMA DO FLUXO DE GÁS EM UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE GÁS.	15
FIGURA 2.2 - DISTRIBUIÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE GÁS NATURAL.....	16
FIGURA 2.3 - PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS EM 10^6 BOE/D (MILHÕES DE BARRIS EQUIVALENTES DE PETRÓLEO POR DIA).	17
FIGURA 2.4 - VOLUME DE QUEIMA EM 10^6 M ³ /D (MILHÕES DE METROS CÚBICOS POR DIA) E ÍNDICE DE UTILIZAÇÃO DO GÁS.....	18
FIGURA 2.5 – CURVA DA BANHEIRA, EVOLUÇÃO DA TAXA DE FALHA NO TEMPO.	20
FIGURA 2.6 – CONFIABILIDADE, PROBABILIDADE ACUMULADA DE FALHA E TAXA DE FALHA ..	21
FIGURA 2.7 - ÁRVORE DE FALHAS.	25
FIGURA 2.8 – DIAGRAMA DE BLOCOS.....	26
FIGURA 2.9 – DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS DE MARKOV.....	27
FIGURA 2.10 – REDE DE PETRI.....	29
FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO.	34
FIGURA 3.2 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA.....	38
FIGURA 3.3 – FRONTEIRA PARA COMPRESSORES.	41
FIGURA 3.4 - REPRESENTAÇÃO DAS TRANSIÇÕES DISPONÍVEIS NO PROGRAMA TIMENET 4.3 MÓDULO EDSPN. A) TRANSIÇÃO IMEDIATA, B) TRANSIÇÃO EXPONENCIAL, C) TRANSIÇÃO DETERMINÍSTICA E D) TRANSIÇÃO GERAL.	45
FIGURA 3.5 – REDE DE PETRI ILUSTRANDO CONDIÇÕES PARA HABILITAÇÃO.	46
FIGURA 4.1 – MODELO A: DIAGRAMA DE BLOCOS.....	47
FIGURA 4.2 – MODELO A: RdPe PARA DISPONIBILIDADE DO SUBSISTEMA “COMPRESSÃO DE INJEÇÃO”: CONFIGURAÇÃO 1 DE 2 EQUIPAMENTOS REPARÁVEIS COM REDUNDÂNCIA DO TIPO <i>STANDBY</i> E 1 EQUIPE DE MANUTENÇÃO.	48
FIGURA 4.3 – MODELO A: RdPe PARA DISPONIBILIDADE DOS SUBSISTEMAS “COMPRESSÃO PRINCIPAL” E “COMPRESSÃO DE EXPORTAÇÃO”: CONFIGURAÇÃO 2 DE 3 EQUIPAMENTOS REPARÁVEIS COM REDUNDÂNCIA DO TIPO <i>STANDBY</i> E 1 EQUIPE DE MANUTENÇÃO.	50

FIGURA 4.4 – MODELO A: RdPE PARA O SISTEMA.	52
FIGURA 4.5 – MODELO A: DISPONIBILIDADE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.	55
FIGURA 4.6 – MODELO A: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA OS SUBSISTEMAS DE “COMPRESSÃO PRINCIPAL” E “COMPRESSÃO DE EXPORTAÇÃO” E SEUS EQUIPAMENTOS.	56
FIGURA 4.7 – MODELO A: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO DE INJEÇÃO” E SEUS EQUIPAMENTOS.	57
FIGURA 4.8 – MODELO A: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA OS SUBSISTEMAS E PARA AS DEMANDAS DE EXPORTAÇÃO E INJEÇÃO DE GÁS.	58
FIGURA 4.9 – MODELO A: DISPONIBILIDADE PARA DIFERENTES VALORES DE MTTF E MTTR PARA A DEMANDA DE EXPORTAÇÃO DE GÁS.	59
FIGURA 4.10 – MODELO A: DISPONIBILIDADE PARA DIFERENTES VALORES DE MTTF E MTTR PARA A DEMANDA DE INJEÇÃO DE GÁS.	59
FIGURA 4.11 – MODELO A: DISPONIBILIDADE EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO CONSIDERANDO OS VALORES DE MTTF MÍNIMO E MTTR MÁXIMO.	60
FIGURA 5.1 – MODELO B: RdPE ELEMENTAR PARA EQUIPAMENTOS E RdPE ELEMENTAR PARA SUBSISTEMAS.	61
FIGURA 5.2 – MODELO B: RdPE PARA DISPONIBILIDADE DOS SUBSISTEMAS ESSENCIAIS.	63
FIGURA 5.3 – MODELO B: RdPE PARA O SUBSISTEMA “DESIDRATAÇÃO DE GÁS”.	63
FIGURA 5.4 – MODELO B: RdPE PARA OS MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.	65
FIGURA 5.5 – MODELO B: DISPONIBILIDADE PARA OS SUBSISTEMAS ESSENCIAIS E PARA O MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.	68
FIGURA 5.6 – MODELO B: PERCENTUAL DO TEMPO NOS MODOS DE OPERAÇÃO INJ_ONLY, EXP_ONLY E NA CONDIÇÃO DE FALHA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.	69
FIGURA 5.7 – MODELO B: PROBABILIDADE DE FALHA E CONFIABILIDADE DO SISTEMA NO TEMPO CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.	70

FIGURA 5.8 – MODELO B: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	71
FIGURA 5.9 – MODELO B: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA OS SUBSISTEMAS CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	72
FIGURA 5.10 – MODELO B: DISPONIBILIDADE DO MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE MTTF E MTTR.....	73
FIGURA 5.11 – MODELO B: INDISPONIBILIDADE DO SISTEMA CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES MTTF E MTTR.	73
FIGURA 5.12 – MODELO B: DISPONIBILIDADE DO MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP ADOTANDO-SE OS VALORES MÍNIMO, MÉDIO E MÁXIMO DE MTTF PARA CADA EQUIPAMENTO ISOLADAMENTE.	74
FIGURA 5.13 – MODELO B: DISPONIBILIDADE DO MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP ADOTANDO-SE OS VALORES MÉDIO E MÁXIMO DE MTTR PARA CADA EQUIPAMENTO ISOLADAMENTE.	75
FIGURA 5.14 – MODELO B: INDISPONIBILIDADE PARA OS SUBSISTEMAS VRU, DEH E DPC COM A VARIAÇÃO DO NÚMERO DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO.	77
FIGURA 5.15 – MODELO B: PROBABILIDADE DE FALHA DO SISTEMA NO TEMPO ADOTANDO-SE OS VALORES MÍNIMO, MÉDIO E MÁXIMO DE MTTF PARA TODOS OS EQUIPAMENTOS SIMULTANEAMENTE.	77
FIGURA 5.16 – MODELO B: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP ADOTANDO-SE OS VALORES MÍNIMO, MÉDIO E MÁXIMO DE MTTF PARA TODOS OS EQUIPAMENTOS SIMULTANEAMENTE.....	78
FIGURA 5.17 – MODELO B: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP ADOTANDO-SE VALORES MÍNIMO E MÁXIMO DE MTTF PARA CADA EQUIPAMENTO ISOLADAMENTE.	79
FIGURA 6.1 – MODELO C: RdPe PARA UMA PLATAFORMA.	83
FIGURA 6.2 – MODELO C: RdPe PARA O CONJUNTO DE 4 PLATAFORMAS.....	84
FIGURA 6.3 – MODELO C: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O MODELO B E PARA O MODELO C CONSIDERANDO UMA PLATAFORMA.	87

FIGURA 6.4 – MODELO C: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O MODO DE OPERAÇÃO INJ_EXP PARA UMA PLATAFORMA OPERANDO ISOLADA E PARA UMA PLATAFORMA OPERANDO NO CONJUNTO.	88
FIGURA 6.5 – MODELO C: PROBABILIDADE DE FALHA NO TEMPO PARA UMA PLATAFORMA CONSIDERANDO UMA PLATAFORMA OPERANDO ISOLADA E UMA PLATAFORMA OPERANDO NO CONJUNTO.	89
FIGURA 6.6 – MODELO C: CONFIABILIDADE NO TEMPO DE 4 PLATAFORMAS ESTAREM OPERANDO NO MODO INJ_EXP.	90
FIGURA 6.7 – MODELO C: PROBABILIDADE NO TEMPO DE 4 PLATAFORMAS ESTAREM EM FALHA.	90
FIGURA 7.1 – MODELO D: RdPE ELEMENTAR PARA EQUIPAMENTOS E RdPE PARA O SUBSISTEMA.	91
FIGURA 7.2 – MODELO D: RdPE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL”.	93
FIGURA 7.3 – MODELO D: CONFIABILIDADE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” CONSIDERANDO VALORES MÉDIOS DE MTTF.	94
FIGURA 7.4 – MODELO D: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE MTTF PARA A FALHA DO EQUIPAMENTO A PARTIR DO ESTADO DEGRADADO.	96
FIGURA 7.5 – MODELO D: CONFIABILIDADE NO TEMPO PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE MTTF.	97
FIGURA A.1 - MODELO B: RdPE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL”.	105
FIGURA A.2 - MODELO B: RdPE PARA O SUBSISTEMA “RECUPERAÇÃO DE VAPOR”.	106
FIGURA A.3 – MODELO B: RdPE PARA O SUBSISTEMA “PONTO DE ORVALHO”.	106
FIGURA A.4 – MODELO B: RdPE PARA O SUBSISTEMA “REMOÇÃO E COMPRESSÃO DE CO ₂ ”.	107
FIGURA A.5 – MODELO B: RdPE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO DE EXPORTAÇÃO”.	108
FIGURA A.6 – MODELO B: RdPE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO DE INJEÇÃO”.	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – SUBSISTEMAS E EQUIPAMENTOS DO SISTEMA (CONTINUA).....	36
TABELA 3.2 – MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	39
TABELA 3.3 – MODELOS DO TRABALHO.....	40
TABELA 3.4 - SUBSISTEMAS PARA OS EQUIPAMENTOS EM ANÁLISE.	42
TABELA 3.5 - TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (MTTF) E TEMPO MÉDIO PARA REPAROS (MTTR) PARA FALHAS DO TIPO CRÍTICAS.	44
TABELA 3.6 - TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (MTTF) E TEMPO MÉDIO PARA REPAROS (MTTR) PARA FALHAS DO TIPO DEGRADADAS.....	44
TABELA 3.7 - TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (MTTF) E TEMPO MÉDIO PARA REPARO (MTTR) PARA O MODELO SIMPLIFICADO.....	44
TABELA 4.1 – LUGARES, ESTADOS DO SISTEMA E DEPENDÊNCIAS.	51
TABELA 4.2 – MODELO A: DISPONIBILIDADE PARA OS SUBSISTEMAS CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	53
TABELA 4.3 – MODELO A: DISTRIBUIÇÃO DE MARCAS POR LUGAR PARA CADA SUBSISTEMA CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	54
TABELA 4.4 – MODELO A: DISPONIBILIDADE PARA AS DEMANDAS DE GÁS CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	54
TABELA 5.1 – MODELO B: TRANSIÇÕES DA RdPe PARA O SUBSISTEMA “DESIDRATAÇÃO DE GÁS”.	64
TABELA 5.2 – MODELO B: TRANSIÇÕES DA RdPe PARA OS MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.	66
TABELA 5.3 – MODELO B: PERCENTUAL DE TEMPO NOS MODOS DE OPERAÇÃO E NA CONDIÇÃO DE FALHA CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.	67
TABELA 5.4 – MODELO B: INDISPONIBILIDADE PARA OS SUBSISTEMAS CONSIDERANDO OS VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	68

TABELA 5.5 – MODELO B: INDISPONIBILIDADE PARA OS SUBSISTEMAS ADOTANDO-SE DIFERENTES VALORES DE MTTF E MTTR PARA O COMPRESSOR CENTRÍFUGO E PARA A TURBINA.....	76
TABELA 5.6 – MODELO B: ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE UTILIZAÇÃO DO GÁS PARA UM PERÍODO DE 1 ANO CONSIDERANDO O VALOR MÉDIO DE MTTR E OS VALORES MÍNIMO, MÉDIO E MÁXIMO DE MTTF.....	80
TABELA 5.7 – MODELO B: ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE UTILIZAÇÃO DO GÁS PARA UM PERÍODO DE 1 ANO CONSIDERANDO O VALOR MÁXIMO DE MTTR E OS VALORES MÍNIMO, MÉDIO E MÁXIMO DE MTTF.....	81
TABELA 6.1 – MODELO C: MODOS DE OPERAÇÃO PARA O CONJUNTO DE PLATAFORMAS.....	82
TABELA 6.2 – MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DA RdPe PARA OS MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DA PLATAFORMA 1.	85
TABELA 6.3 – MODELO C: VALORES DE MTTF E MTTR PARA OS SUBSISTEMAS.....	86
TABELA 6.4 – MODELO C: PERCENTUAL DE TEMPO NOS MODOS DE OPERAÇÃO E NA CONDIÇÃO DE FALHA PARA O MODELO B E PARA O MODELO C CONSIDERANDO UMA PLATAFORMA.	86
TABELA 6.5 – MODELO C: PERCENTUAL DE TEMPO NOS MODOS DE OPERAÇÃO E NA CONDIÇÃO DE FALHA PARA UMA PLATAFORMA OPERANDO ISOLADA E PARA UMA PLATAFORMA OPERANDO NO CONJUNTO.	88
TABELA 6.6 – MODELO C: PROBABILIDADE DE UM NÚMERO DE PLATAFORMAS ESTAR EM CADA MODO DE OPERAÇÃO E NA CONDIÇÃO DE FALHA PARA O CONJUNTO DE PLATAFORMAS.	89
TABELA 7.1 – MODELO D: DISPONIBILIDADE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” CONSIDERANDO VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	94
TABELA 7.2 – MODELO D: DISPONIBILIDADE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” EM FUNÇÃO DO AUMENTO NO NÚMERO DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO CONSIDERANDO VALORES MÉDIOS DE MTTF E MTTR.....	95
TABELA 7.3 – MODELO D: DISPONIBILIDADE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” PARA DIFERENTES VALORES DE MTTF PARA A FALHA DO EQUIPAMENTO A PARTIR DO ESTADO DEGRADADO.	95
TABELA 7.4 – MODELO D: DISPONIBILIDADE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE MTTF E MTTR.....	96

TABELA 7.5 – MODELO D: DISPONIBILIDADE PARA O SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” CONSIDERANDO O VALOR MÍNIMO DE MTTF E VALOR MÁXIMO DE MTTR.....	97
TABELA B.1 - MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DO SUBSISTEMA “COMPRESSÃO PRINCIPAL” (CONTINUA).	110
TABELA B.2 - MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DO SUBSISTEMA “RECUPERAÇÃO DE VAPOR”.	112
TABELA B.3 - MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DO SUBSISTEMA “DESIDRATAÇÃO DE GÁS” (CONTINUA).....	112
TABELA B.4 - MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DO SUBSISTEMA “PONTO DE ORVALHO” (CONTINUA).	114
TABELA B.5 - MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DO SUBSISTEMA “REMOÇÃO E COMPRESSÃO DE CO ₂ ” (CONTINUA).....	116
TABELA B.6 - MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DO SUBSISTEMA “COMPRESSÃO DE EXPORTAÇÃO” (CONTINUA).	120
TABELA B.7 - MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DO SUBSISTEMA “COMPRESSÃO DE INJEÇÃO” (CONTINUA).	122
TABELA C.1 – MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DAS RdPE DOS SUBSISTEMAS DA PLATAFORMA 1.	124
TABELA C.2 - MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DAS RdPE DOS SUBSISTEMAS DA PLATAFORMA 2.	124
TABELA C.3 - MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DAS RdPE PARA OS MODOS DE OPERAÇÃO DA PLATAFORMA 2 (CONTINUA).....	124
TABELA C.4 - MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DAS RdPE DOS SUBSISTEMAS DA PLATAFORMA 3.	125
TABELA C.5 - MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DAS RdPE PARA OS MODOS DE OPERAÇÃO DA PLATAFORMA 3 (CONTINUA).....	125
TABELA C.6 - MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DAS RdPE DOS SUBSISTEMAS DA PLATAFORMA 4.	126

TABELA C.7 - MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS DAS
RDPE PARA OS MODOS DE OPERAÇÃO DA PLATAFORMA 4 (CONTINUA)..... 126

TABELA D.1 – MODELO D: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS
(CONTINUA). 128

1 INTRODUÇÃO

Uma unidade de produção offshore do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*) é uma unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de petróleo. É formada por diversos subsistemas que compõe a planta de processamento primário de fluídos destinada a separar o óleo, o gás e a água e processar estas fases de modo a enquadrá-las nos requisitos para transferência (óleo e gás) e descarte (água). O óleo enquadrado é transferido para terra por meio de navios tanques. O gás, após o tratamento e em função das diferentes demandas, pode ser transferido para os gasodutos da malha de distribuição de gás, utilizado como gás combustível na plataforma, utilizado no processo de elevação artificial de petróleo (*gas lift*) ou, ainda, injetado nos reservatórios geológicos para promover maior recuperação de petróleo. Além disso, uma parte do gás produzido é queimada para manter a pressão do sistema em condição normal de operação ou em eventos de falha e/ou emergência (THOMAS, 2004).

O gás produzido pode ser classificado como gás não associado ou gás associado. O gás não associado é aquele que se encontra livre de óleo e água no reservatório geológico, nesse tipo de reservatório se produz basicamente gás natural. O gás associado é aquele que se encontra dissolvido no óleo ou sob a forma de uma capa de gás na parte superior do reservatório geológico, nesse caso a produção de óleo é privilegiada e determinante para a exploração dos reservatórios e o gás é utilizado para manter a pressão do reservatório. No Brasil, o gás produzido é predominantemente de origem associada (ANP, 2017).

O gás proveniente da separação é submetido a um conjunto de processos de modo a remover ou reduzir o teor de contaminantes e a atender às especificações de ponto de orvalho e teores máximos de compostos de enxofre, dióxido de carbono e água para permitir o consumo na unidade, seu transporte e posterior comercialização. O dióxido de carbono em grandes concentrações reduz o poder calorífico do gás e na presença de água forma ácido carbônico que é altamente corrosivo. Nos reservatórios do pré-sal, o teor do gás carbônico no gás produzido é muito superior aos valores usualmente encontrados nos demais reservatórios. A transferência de gás rico em dióxido de carbono para tratamento em terra implicaria em necessidade de proteção anticorrosiva nos gasodutos e um maior custo no transporte por unidade de energia.

Para viabilizar economicamente a produção e evitar a liberação de desse composto na atmosfera, as unidades de produção utilizam tecnologias para separação de dióxido de carbono e posterior injeção desse gás.

A necessidade de tratamento do gás e os altos níveis de pressão requeridos implicam em maior complexidade nas plantas de processamento primário de fluídos, especialmente no sistema de tratamento de gás. As unidades de produção de petróleo *offshore* têm restrições de projeto ligadas a espaço físico e restrições de manutenção relacionadas a recursos humanos e recursos materiais a bordo e à logística de materiais sobressalentes. Esse contexto *offshore* e a grande quantidade de subsistemas e equipamentos torna um desafio a manutenção da confiabilidade e disponibilidade e consequente eficiência dessas unidades.

As crescentes demandas de disponibilização de gás para o mercado, além das políticas públicas para redução de emissões de gases de efeito estufa, têm suscitado a preocupação com o aumento da eficiência no aproveitamento de gás produzido. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regula e fiscaliza as atividades de produção de óleo e gás no Brasil e exige que a empresa operadora de uma unidade *offshore* de produção informe as previsões de volumes de exportação, injeção, consumo e queima e justifique eventuais desvios decorrentes de limitações operacionais, manutenções programadas ou eventos de falha ou emergência (BRASIL, 2000). A eficiência no aproveitamento do gás está ligada diretamente à disponibilidade e confiabilidade do sistema de tratamento de gás.

Dentre as técnicas de análise de confiabilidade e disponibilidade de sistemas, as redes de Petri estocásticas se destacam por permitir modelar redundâncias, reconfigurações do sistema, transições de estado determinísticas ou estocásticas, aspectos logísticos e de manutenção por meio de lógica. Percebe-se na literatura a falta de uma análise detalhada que permita avaliar a aplicabilidade das redes de Petri estocásticas para um sistema composto de diversos subsistemas e equipamentos sujeitos a diferentes modos de operação e reconfigurações. Além disso, não se identificam trabalhos relacionados ao sistema de tratamento de gás visando estimar os parâmetros de desempenho do sistema e relacionar com os volumes de movimentação de gás, informações relevantes que podem ser utilizadas nas previsões requeridas pela ANP além de permitir propor estratégias de manutenção ou alterações de projeto para melhorar a eficiência do sistema.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é criar um modelo de rede de Petri estocástica para um sistema de tratamento de gás em instalações *offshore*, que permita avaliar a confiabilidade e disponibilidade do sistema e seus subsistemas para diferentes cenários de operação e manutenção e prever o índice de utilização de gás.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 8 capítulos. O capítulo 1, introdutório, apresentou resumidamente o contexto do sistema de tratamento de gás de uma unidade de produção petróleo *offshore* bem como o objetivo do trabalho.

O capítulo 2 apresenta um detalhamento do sistema de tratamento de gás e alguns conceitos básicos de análise de confiabilidade e disponibilidade como as definições de probabilidade de falha, taxa de falha, confiabilidade, taxa de reparo, disponibilidade e uma revisão da literatura quanto aos métodos de análise.

O capítulo 3 aborda os materiais e métodos empregados para a construção e análise dos modelos, passando pela definição do escopo do sistema em análise, definição das hipóteses consideradas e apresentação dos modelos que serão avaliados nos capítulos subsequentes. Além disso são apresentados os dados de falha utilizados e a ferramenta de análise adotada.

O capítulo 4 analisa o modelo A, um modelo reduzido composto de três subsistemas e utilizado para validação dos resultados comparando-os com equações propostas na literatura.

O capítulo 5 é destinado ao modelo principal do trabalho, o modelo B, que inclui todos os subsistemas do sistema de tratamento de gás.

No capítulo 6, o modelo C é analisado. Trata-se de um modelo composto de um conjunto de plataformas que tem por objetivo avaliar restrições quanto a injeção e exportação de gás que não foram consideradas na análise isolada de uma plataforma no modelo B.

O capítulo 7 avalia o modelo D, que considera um dos subsistemas e dois modos de falha por equipamento. O objetivo é verificar a influência de dois modos de falha nos resultados e comparar com aqueles obtidos no modelo B no qual foi considerado apenas um modo de falha.

Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA DE TRATAMENTO DE GÁS

A Figura 2.1 representa um esquema do fluxo de gás em um sistema de tratamento de gás típico de uma unidade de produção *offshore* instalada na região do pré-sal. O subsistema de “Compressão principal” recebe gás dos separadores de produção e da “Recuperação de vapor” e eleva a pressão do gás até um certo nível. Os subsistemas de “Desidratação” e “Controle do ponto de orvalho” possibilitam a remoção de água, etapa fundamental para permitir a utilização desse gás como combustível na plataforma e para o subsistema seguinte, de “Remoção de CO₂”, que não tolera gás úmido. O gás pode ser desviado do subsistema de “Remoção de CO₂” a depender do teor de dióxido de carbono ou da disponibilidade desse subsistema conforme indicado pela linha tracejada na Figura 2.1. Após a remoção de CO₂, a corrente de gás pobre em CO₂ segue para o subsistema “Compressão de exportação” e a corrente de gás rico em CO₂ deve antes passar por mais uma compressão no subsistema “Compressão de CO₂”. O subsistema “Compressão de exportação” é o que permite que o gás adquira energia suficiente e supere as perdas de carga ao longo dos gasodutos. Nesse nível de pressão, o gás também pode ser utilizado para elevação artificial (*gas lift*). Por fim, o subsistema de “Compressão de injeção” eleva a pressão do gás a níveis superiores ao do reservatório para permitir a sua injeção.

A unidade de produção conta com queimadores de segurança chamados *flare*, para onde são enviadas as correntes de gás oriundas de válvulas de alívio e segurança que visam manter a pressão do sistema em condição normal de operação e em caso de paradas de emergência, falha dos subsistemas de compressão, durante a realização de manutenções programadas no sistema de tratamento de gás ou no início da operação de novas unidades.

Figura 2.1 - Esquema do fluxo de gás em um sistema de tratamento de gás.

Fonte: Autor.

As possibilidades de utilização do gás configuram diferentes modos de operação do sistema de processamento de gás em função de demandas de caráter produtivo ou operacional. As demandas de caráter produtivo incluem o volume requerido para consumo na plataforma, o volume de exportação admitido pela malha de distribuição, o volume de injeção admitido pelo reservatório e o limite de queima enquanto as demandas de caráter operacional surgem em eventos como paradas de emergência ou indisponibilidade de subsistemas de tratamento de gás.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regula e fiscaliza as atividades de produção de óleo e gás no Brasil. É exigido da empresa operadora da unidade de produção a entrega de boletins mensais de produção além do Programa Anual de Produção (PAP), regido pela Portaria nº100/2000, que inclui dentre outros a previsão de movimentação de gás, volume disponibilizado para o mercado, volume destinado à injeção nos reservatórios, consumo de gás previsto na unidade e a previsão de queima (BRASIL, 2000).

A Portaria nº 249/2000 da ANP categoriza e classifica as queimas de gás e define os limites. É admitido, sem necessidade de autorização prévia, um volume de queima de

até 3% da produção mensal associado do campo. O volume de queima mensal não poderá ser superior a 15% em relação ao previsto e o volume anual não poderá ser superior a 10% em relação ao previsto. Em caso de comprovada necessidade operacional, os desvios devem ser justificados no boletim mensal de produção (BRASIL, 2000).

Por meio de termos de compromisso a ANP estabelece acordos com as operadoras para a redução do volume queimado a médio prazo incluindo metas para utilização do gás produzido. A Figura 2.2 apresenta a distribuição da movimentação de gás natural de 2010 a 2017. Ao longo desse período observa-se uma redução do percentual de gás queimado e consequente aumento da disponibilização de gás para o mercado e para injeção.

Figura 2.2 - Distribuição da movimentação de gás natural.

Fonte: Adaptado do boletim mensal da produção de petróleo e gás natural (ANP, 2018).

O gás natural produzido no Brasil é predominantemente de origem associada ao petróleo de forma que o crescimento da produção de petróleo acarreta inevitavelmente um aumento da produção de gás. A Figura 2.3 ilustra o aumento da produção de petróleo e de gás no Brasil de 2010 a 2017.

Figura 2.3 - Produção de petróleo e gás em 10^6 boe/d (milhões de barris equivalentes de petróleo por dia).

Fonte: Adaptado do boletim mensal da produção de petróleo e gás natural (ANP, 2018).

O índice de utilização do gás (IUGA) é definido como a razão entre a quantidade de gás utilizado (consumo, exportação, injeção) e a quantidade de gás produzido. Pode ser calculado pela Equação 1, sendo V_{cons} o volume de gás consumido, V_{exp} o volume de gás exportado, V_{inj} o volume de gás injetado, V_{pro} o volume de gás produzido e V_{que} o volume de gás queimado (BRASIL, 2000). Esse índice está diretamente ligado a disponibilidade e confiabilidade do sistema de tratamento de gás, já que as falhas desse sistema levam à queima. A Figura 2.4 apresenta a evolução do índice relacionando à produção de gás no Brasil de 2010 a 2017. Observa-se um aumento significativo do índice de utilização de gás capaz de compensar o aumento da sua produção e gerar uma redução do volume queimado.

$$IUGA = \frac{V_{cons} + V_{exp} + V_{inj}}{V_{pro}} = 1 - \frac{V_{que}}{V_{pro}} \quad (1)$$

Figura 2.4 - Volume de queima em $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ (milhões de metros cúbicos por dia) e índice de utilização do gás.

Fonte: Adaptado do boletim mensal da produção de petróleo e gás natural (ANP, 2018).

2.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE

2.2.1 Definições

Um componente, equipamento ou sistema é dito em falha quando deixa de desempenhar sua função num nível padronizado de desempenho dentro de um contexto operacional (LEWIS, 1994) (MOUBRAY, 1999).

As variações de capacidade e demanda inerentes a qualquer componente e processo além de limitações do ponto de vista de projeto, construção e operação impedem que um sistema mantenha sua condição operacional indefinidamente, as falhas sempre irão ocorrer. É papel da engenharia de confiabilidade prever e minimizar a ocorrência e recorrência de falhas por meio da compreensão de suas causas, mecanismos e da frequência com que ocorrem.

A confiabilidade de um equipamento é definida como a probabilidade de que esse equipamento irá desempenhar sua função por um período de tempo determinado e sob dadas condições. Lewis (1994) apresenta o desenvolvimento que permite expressar a confiabilidade em termos da variável aleatória T . A probabilidade que uma falha ocorra num tempo entre t e $t + \Delta t$ para um Δt infinitesimal pode ser escrita por meio da função densidade de probabilidade de ocorrência de falha, $f(t)$, de acordo com a Equação 2.

$$f(t)\Delta t = P\{t < \mathbf{T} < t + \Delta t\} \quad (2)$$

A Equação 3 indica a função de probabilidade acumulada de falha e denota a probabilidade que uma falha ocorra num tempo menor ou igual a t .

$$F(t) = P\{\mathbf{T} \leq t\} \quad (3)$$

A confiabilidade de um sistema operar sem falha por um período de tempo t é o complemento da probabilidade acumulada de falha e pode ser expressa pela Equação 4. Em função das propriedades da função densidade de probabilidade, a confiabilidade varia de um valor 1 para o instante de tempo t igual a zero e 0 para um instante de tempo infinito.

$$R(t) = P\{\mathbf{T} > t\} = 1 - F(t) \quad (4)$$

O comportamento de um equipamento com relação à falha pode ser melhor compreendido por meio da análise de sua taxa de falha $\lambda(t)$. A taxa de falha é associada a probabilidade condicional de que um equipamento irá falhar num instante $\mathbf{T} < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou no instante $\mathbf{T} = t$, de acordo com a Equação 5.

$$\lambda(t)\Delta t = P\{\mathbf{T} < t + \Delta t | \mathbf{T} > t\} \quad (5)$$

A taxa de falha também pode ser definida em termos da confiabilidade de acordo com a Equação 6.

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (6)$$

O tempo médio até a falha pode ser expresso por meio da Equação 7.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (7)$$

Um equipamento pode apresentar comportamentos distintos da taxa de falha e, portanto, probabilidade de falha distinta ao longo de sua vida útil. Na Figura 2.5 é apresentada a chamada curva da banheira usualmente citada por permitir ilustrar a evolução da taxa de falha no tempo (MOUBRAY, 1999). Na primeira fase a incidência de falha é alta e a taxa é decrescente, é a chamada mortalidade infantil, relacionada a falhas precoces oriundas geralmente de defeito de fabricação. Na fase seguinte observa-se uma taxa de falha aproximadamente constante, característica de falhas aleatórias relacionadas a sobrecargas não previstas ou a própria característica do

equipamento e na última fase a taxa de falha é crescente, indicativa de falhas por envelhecimento, danos acumulados como por exemplo desgaste, corrosão, fadiga.

Figura 2.5 – Curva da banheira, evolução da taxa de falha no tempo.

Fonte: Autor.

Para modelar os comportamentos quanto à falha são utilizadas diferentes distribuições de probabilidade. A taxa de falha constante é modelada por meio da distribuição exponencial, muito comumente utilizada por representar a distribuição de tempo até a falha de componentes eletrônicos, equipamentos e sistemas de natureza complexa formados por componentes com distribuições distintas desde que não haja dominância de um componente sobre os demais na incidência de falha. Equipamentos com muitos componentes submetidos a manutenção preventiva quando analisados sob o nível do equipamento exibem um comportamento de taxa de falha praticamente constante desde que as atividades de prevenção tenham sido corretamente planejadas e executadas. Esse é também o caso de sistemas complexos com muitos subsistemas ou componentes sujeitos a muitos mecanismos de deterioração (KECECIOGLU, 2002).

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de curvas de probabilidade acumulada de falha $F(t)$, confiabilidade $R(t)$ e taxa de falha no tempo $\lambda(t)$ para uma distribuição exponencial. Observa-se que a confiabilidade é o complemento da probabilidade de falha e que a taxa de falha é constante no tempo. O tempo médio até a falha (MTTF) é dado pelo inverso da taxa de falha e correspondente a uma probabilidade de falha de 63,2% e confiabilidade de 36,8%. Nesse exemplo, o MTTF é de 2000 horas.

Figura 2.6 – Confiabilidade, probabilidade acumulada de falha e taxa de falha

Fonte: Autor.

Para modelar as fases de falhas precoces ou falhas por envelhecimento são utilizadas distribuições de probabilidade específicas dentre as quais destacam-se a distribuição Normal, a Lognormal e a distribuição de Weibull. A distribuição Normal é adequada aos casos em que há uma vida útil bem definida a qual pode ser associada uma incerteza. A distribuição Lognormal é apropriada a casos em que a vida útil pode ser associada a um intervalo de tempo e a uma incerteza. A distribuição de Weibull é a mais utilizada por oferecer maior flexibilidade e modelar comportamentos distintos, mediante uma escolha apropriada dos parâmetros dessa distribuição (LEWIS, 1994).

A confiabilidade determina o comportamento de um sistema até este atingir o estado de falha. Após a falha, para que o sistema volte a desempenhar sua função é necessária a realização de um reparo ou manutenção corretiva. Na análise dos sistemas ditos reparáveis, é importante a definição de manutenibilidade e disponibilidade.

O tempo para reparo depende de inúmeros fatores e pode ser expresso por meio da variável aleatória T e da função densidade de probabilidade de reparo $m(t)$. A Equação 8 denota a probabilidade que um reparo requeira um tempo entre t e $t + \Delta t$.

$$m(t)\Delta t = P\{t < T < t + \Delta t\} \quad (8)$$

A função de probabilidade acumulada correspondente, expressa na Equação 9, é a chamada manutenibilidade.

$$M(t) = \int_0^t m(t)dt \quad (9)$$

O tempo médio para reparo é expresso por meio da Equação 10.

$$MTTR = \int_0^{\infty} tm(t)dt \quad (10)$$

A taxa de reparo $\mu(t)$ pode ser obtida por meio da probabilidade condicional de que o sistema será reparado entre t e $t + \Delta t$ dado que ainda está no estado de falha no instante t , o que permite chegar a Equação 11.

$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (11)$$

A disponibilidade pode ser definida como a proporção do tempo em que um equipamento ou sistema se encontra disponível para uso e, portanto, depende das taxas de falha e de reparo. A disponibilidade instantânea pode ser definida como a probabilidade que um sistema esteja desempenhando sua função num tempo t . Lewis (1994) define a disponibilidade para um intervalo de tempo $[0, X]$ de acordo com a Equação 12.

$$A(X) = \frac{1}{X} \int_0^X A(t)dt \quad (12)$$

Geralmente após um período transiente, observa-se que a disponibilidade instantânea tende para um valor independente do tempo, um valor em estado estacionário definido através da Equação 13.

$$A(\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{X} \int_0^X A(t)dt \quad (13)$$

Para taxas de falha λ e taxa de reparo μ constantes, a disponibilidade em estado estacionário tende ao valor expresso pela Equação 14. Quando se está interessado na disponibilidade média durante um período de tempo longo quando comparado ao tempo médio entre falhas, a disponibilidade se mostra menos sensível às distribuições de falha ou reparo, e essa expressão se mostra adequada mesmo que as taxas de falha e de reparo não sejam constantes (LEWIS, 1994).

$$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (14)$$

2.2.2 Confiabilidade e disponibilidade de sistemas

Um sistema é composto de diversos equipamentos com comportamentos de falha diversos. A confiabilidade de um sistema é determinada por meio da confiabilidade de cada equipamento.

A associação de equipamentos em série implica que o sistema tenha uma confiabilidade sempre menor que a confiabilidade de cada equipamento sozinho, já que a falha de um dos equipamentos leva o sistema a um estado de falha. A Equação 15 (LEWIS, 1994) apresenta a confiabilidade de um sistema em série com N equipamentos para o caso de falhas independentes, em que R_n é a confiabilidade do n -ésimo equipamento.

$$R_s = R_1 R_2 \dots R_n \dots R_N \quad (15)$$

Uma alternativa para reduzir a probabilidade de falha de um sistema é a aplicação de redundâncias, associando equipamentos em paralelo, de forma que o sistema mantenha sua condição operacional mesmo após a falha de um ou mais equipamentos. A redundância pode ser do tipo ativa, quando os equipamentos associados em paralelo operam simultaneamente, e do tipo passiva ou *standby*, quando o equipamento redundante só entra em operação após a falha de um equipamento da associação.

A Equação 16 (LEWIS, 1994) apresenta a confiabilidade de um sistema com redundância passiva do tipo 1/N equipamentos, em que N é o número de equipamentos idênticos. O sistema necessita de apenas 1 equipamento operando e os demais $N - 1$ equipamentos permanecem em *standby* até que ocorra a falha no equipamento primário.

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{i!} (\lambda t)^i \quad (16)$$

A Equação 17 (RIAC, 1995) apresenta a confiabilidade de um sistema com redundância passiva do tipo N de k em que N equipamentos operam e k - N equipamentos permanecem em *standby*.

$$R_s(t) = e^{-n\lambda t} \sum_{i=0}^{n-k} \frac{(n\lambda t)^i}{i!} \quad (17)$$

As equações 16 e 17 consideram que a confiabilidade dos componentes é representada por uma distribuição exponencial.

A disponibilidade de um sistema também pode ser determinada em função da disponibilidade de seus equipamentos para alguns casos. A Equação 18 (LEWIS, 1994) define a disponibilidade para um sistema com N equipamentos em série para o caso de falhas e reparos independentes, em que A_n é a disponibilidade do enésimo equipamento.

$$A_s = A_1 A_2 \dots A_n \dots A_N \quad (18)$$

Para um sistema com redundância do tipo ativa, com N equipamentos redundantes, todos os equipamentos devem estar indisponíveis para que o sistema esteja indisponível. A Equação 19 (LEWIS, 1994) determina a disponibilidade para o sistema.

$$A_s = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - A_n) \quad (19)$$

2.2.3 Métodos de análise de confiabilidade e disponibilidade

A análise de sistemas através da associação dos valores de confiabilidade e disponibilidade dos seus equipamentos é uma das técnicas mais usuais, no entanto exige a hipótese de que as falhas e os reparos são independentes, o que na realidade geralmente não é o caso. Para considerar as interações e dependências entre as falhas e reparos é necessário recorrer a modelos mais sofisticados (LEWIS, 1994).

A modelagem de sistemas complexos, para avaliação de confiabilidade ou disponibilidade, geralmente utiliza uma representação gráfica das relações entre os diversos componentes do sistema ou entre seus estados e permite a análise

quantitativa das probabilidades relacionadas à falha do sistema ou à permanência em determinados estados. Dentre as principais técnicas de análise destacam-se árvore de falhas, diagramas de blocos, análise de Markov e Redes de Petri.

A técnica de análise de confiabilidade por meio de árvore de falhas (*Fault Tree Analysis*) inicia pela definição de um evento topo e em seguida um processo dedutivo que relaciona todos os eventos que podem levar a ocorrência desse evento topo até a identificação dos eventos básicos (falhas de componentes ou equipamentos). Uma simbologia padrão é utilizada para descrever os eventos e portas lógicas. A análise qualitativa consiste na manipulação dos eventos por meio de álgebra booleana para identificar os cortes mínimos (combinações mínimas de eventos que levam ao evento topo) e, portanto, os componentes ou equipamentos mais críticos. A análise quantitativa envolve a determinação da probabilidade de ocorrência do evento topo através de associações em série e paralelo das probabilidades de falha dos componentes ou equipamentos (MODARRES, 1993).

A Figura 2.7 ilustra, como exemplo, uma árvore de falhas para um sistema composto de 2 subsistemas redundantes A e B. O subsistema A é composto dos equipamentos 1 e 2 em série, e o subsistema B é composto dos equipamentos 3 e 4 em paralelo. O sistema não opera se houver falha no subsistema A ou no subsistema B, o subsistema A falha se houver falha no equipamento 1 ou no equipamento 2, o subsistema B falha se houver falha no equipamento 3 e no equipamento 4.

Figura 2.7 - Árvore de Falhas.

A lógica de falha de um sistema pode ser representada através de um diagrama de blocos. Para sistemas envolvendo interações complexas, podem ser necessários diferentes diagramas de bloco para representar as possíveis falhas do sistema. A análise de confiabilidade por meio de diagramas de bloco (RBD: *Reliability Block Diagram*) consiste na manipulação do diagrama reduzindo-o a sistemas simples que possam ser analisados com as formulações de associação em série e paralelo desde as falhas sejam independentes. A análise de confiabilidade precisa ser realizada por engenheiros com conhecimento prático e experiência no projeto, operação e manutenção do sistema (O'CONNOR; KLEINER, 2002). A Figura 2.8 ilustra um diagrama de blocos para um sistema exemplo e as equações para cálculo da confiabilidade do sistema R_S sendo R_A a confiabilidade do subsistema A, R_B a confiabilidade do subsistema B e R_1 , R_2 , R_3 e R_4 a confiabilidade dos equipamentos de 1 a 4.

Figura 2.8 – Diagrama de blocos.

Fonte: Autor.

O método de Markov é usualmente aplicada em estudos de confiabilidade e disponibilidade, particularmente em sistemas com múltiplos estados ou reparáveis para os quais a técnica de diagramas de blocos não é aplicável. A Figura 2.9 apresenta um diagrama de transição de estados de Markov para um sistema simples com um equipamento e dois estados. Os arcos representam as transições entre um estado e outro, a taxa de transição do estado operacional para o estado em falha é a taxa de falhas λ , a taxa de transição do estado em falha para o estado operacional é a taxa de reparo, μ .

Figura 2.9 – Diagrama de transição de estados de Markov.

Fonte: Autor.

A matriz de transição de estados define as probabilidades de transição de um estado para outro qualquer incluindo a possibilidade de permanecer no mesmo estado. A probabilidade de que o sistema, estando “Operacional” em um tempo t , irá falhar entre um tempo t e $t+\Delta t$ pode ser calculada pelo produto da taxa de falha pelo intervalo de tempo, $\lambda\Delta t$. De maneira similar, a probabilidade de que o sistema, estando “Em falha” num tempo t , seja reparado entre um tempo t e $t+\Delta t$, pode ser calculada por $\mu\Delta t$. Dessa forma, a probabilidade de que o sistema esteja no estado operacional (1) após um incremento de tempo Δt pode ser determinada pela Equação 20 (LEWIS, 1994).

$$P_1(t + \Delta t) = (1 - \lambda\Delta t)P_1 + \mu\Delta tP_2 \quad (20)$$

Do mesmo modo, a probabilidade de que o equipamento esteja no estado em falha (2) após um incremento de tempo Δt pode ser determinada pela Equação 21.

$$P_2(t + \Delta t) = \lambda\Delta tP_1 - (1 - \mu\Delta t)P_2 \quad (21)$$

A associação das Equações 20 e 21 resulta na Equação 22, sendo P a matriz de transição de estados, v_0 o vetor de probabilidades de um estado inicial qualquer e v_1 o vetor de probabilidades obtido após um incremento de tempo. Multiplicando novamente a matriz de transições pelo vetor v_1 obtém-se o vetor de probabilidades após um novo incremento de tempo. As Equações 20 e 21 também podem escritas na forma diferencial e resolvidas para se determinar uma equação para a disponibilidade do sistema.

$$v_1 = \begin{bmatrix} P_1(t + \Delta t) \\ P_2(t + \Delta t) \end{bmatrix} = P * v_0 = \begin{bmatrix} (1 - \lambda\Delta t) & \mu\Delta t \\ \lambda\Delta t & (1 - \mu\Delta t) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

O método de Markov é uma das técnicas mais conhecidas de *state-space analysis* (análise de espaços de estados). As seguintes restrições devem ser observadas: as probabilidades de se mudar de um estado para o outro devem permanecer constantes e portanto as taxas de falha consideradas devem ser constantes, além disso os estados futuros do sistema são dependentes apenas do último estado do sistema, de forma que um reparo leva o sistema a uma condição como novo (O'CONNOR; KLEINER, 2002).

Uma extensão das técnicas de análise de espaços de estados aplicada à análise de confiabilidade e disponibilidade é a Rede de Petri estocástica (RdPe), um desdobramento da rede de Petri (RdP) original. Na RdPe os equipamentos ou subsistemas podem ser representados individualmente e o estado do sistema pode ser determinado pelo conjunto de marcações da RdPe, característica que dá boa flexibilidade à modelagem. Não há limitação quanto ao tipo de distribuição que pode ser associada ao tempo de disparo de uma transição para uma rede de Petri estocástica, portanto, não existe a limitação de taxa de falha constante como no método de Markov. (O'CONNOR; KLEINER, 2002).

A RdP original é independente do tempo, utilizada para modelagem de eventos discretos e surgiu em 1962 com Carl Adam Petri. É uma ferramenta gráfica e matemática aplicável a diversas áreas do conhecimento. Os símbolos gráficos básicos são chamados lugares (representados por círculos), transições (representados por retângulos), arcos (representados por setas) e marcas (representados por pontos). Os lugares representam condições, as transições representam eventos, os arcos ligam um lugar a uma transição ou uma transição a um lugar, um lugar pode conter marcas e o conjunto de marcas de uma RdP determina o seu estado. Cada arco tem um peso associado, um arco com peso k pode ser interpretado como k arcos paralelos (MURATA, 1989).

Para uma RdP elementar na qual os arcos têm peso igual a um, a regra básica que rege o funcionamento é que uma transição está habilitada para ocorrer se cada um dos lugares de entrada contiver uma marca. Após o disparo de uma transição o número de marcas de cada lugar de entrada é diminuído de uma unidade e o número de marcas de cada lugar de saída é aumentado em uma unidade (MURATA, 1989).

Na RdP original as transições são disparadas instantaneamente. As redes de Petri chamadas estendidas foram introduzidas no final dos anos 1970. Nessas redes uma transição é associada com um tempo que posterga o disparo da transição, esse tempo pode ser determinístico ou randomicamente distribuído. Se o tempo for determinístico, a rede é chamada rede de Petri determinística, se os tempos são variáveis aleatórias a rede é chamada rede de Petri estocástica (RdPe). Nas redes de Petri estendidas existem ainda o arco de inibição (representados por uma reta e um círculo no local da seta) que conecta um lugar a uma transição. Um arco de inibição desabilita uma transição se o lugar de entrada contiver uma marca e habilita a transição se o lugar não contiver uma marca (MURATA, 1989).

Em análises de confiabilidade ou disponibilidade por meio de RdPe, os lugares correspondem aos estados do sistema e as transições correspondem aos eventos de falha ou reparo. A Figura 2.10 ilustra um exemplo com dois lugares e duas transições, a marca indica que o sistema se encontra operacional.

Figura 2.10 – Rede de Petri.

Fonte: Autor.

A definição da distribuição de tempo associada ao tempo de disparo não é suficiente para caracterizar o processo estocástico que depende também da política de seleção da transição a disparar (*choice policy*), da política de servidores (*server policy*) e da política de memória (*memory policy*) (DIAZ, 2009).

A política de seleção da transição a disparar pode ser do tipo pré-seleção, em que é realizada uma seleção probabilística que define a transição que irá disparar e em seguida realizado o sorteio do tempo de disparo, ou do tipo pós-seleção, a mais usual, em que é realizado os sorteios dos tempos de disparo associados à cada transição habilitada e em seguida é selecionada para disparo a transição de menor tempo

(DIAZ, 2009).

A política de servidores está relacionada à maneira como uma transição com múltiplos clientes (uma transição associada a vários lugares ou a um lugar com mais de uma marca) realiza o sorteio do tempo de disparo, a política do tipo servidor único sorteia um tempo por vez e a política do tipo servidores múltiplos ou infinitos sorteia de uma única vez um número de tempos que pode ser inferior ou igual ao número de clientes (DIAZ, 2009).

A política de memória diz respeito a como é tratado o tempo sorteado para uma transição que não foi disparada. Considerando uma transição (T_1) que foi selecionada para disparo (num tempo t_{T1}), e uma transição (T_2) com tempo sorteado (t_{T2}) que não foi disparada, são quatro os tipos da política de memória: a política do tipo *resampling memory* (resorteio) esquece o tempo sorteado (t_{T2}) e sorteia um novo tempo se a transição permanecer habilitada; a política do tipo *preemptive repeat different* (preferencialmente repete diferente) consiste em memorizar o tempo sorteado diminuído do tempo da transição disparada ($t_{T2} - t_{T1}$) desde que a transição permaneça habilitada; a política do tipo *preemptive repeat identical* (preferencialmente repete idêntico) memoriza o tempo sorteado diminuído do tempo da transição disparada ($t_{T2} - t_{T1}$) se a transição permanecer habilitada porém, se a transição for desabilitada armazena esse tempo sorteado inalterado (t_{T2}) para a próxima vez que a transição for habilitada; a política do tipo *preemptive resume* (preferencialmente retoma) armazena o tempo sorteado diminuído do tempo da transição disparada ($t_{T2} - t_{T1}$) mesmo que a transição seja desabilitada (DIAZ, 2009).

A aplicação de RdPe para cálculo de confiabilidade tem se intensificado principalmente após os anos 2000. Os trabalhos publicados sugerem que a RdPe é eficaz para modelar interações e dependências entre componentes, aspectos e restrições de manutenção e logística.

Ghosh, Ghosh e Mohanta (2017) utilizaram RdPe para analisar o efeito da confiabilidade de uma unidade de medição fasorial e de seus módulos no sistema de controle de uma rede de distribuição de energia elétrica.

Gonçalves, Sobral e Ferreira (2017) propuseram um modelo para avaliação de risco de um veículo aéreo não tripulado identificando a frequência de ocorrência dos cenários de risco e a habilidade de resposta da aeronave em situações de falha.

Song, Liu e Schnieder (2017) avaliaram a confiabilidade e o desempenho em segurança de um sistema de medição de distância entre trens.

Vileiniskis e Remenyte-Prescott (2017) avaliaram a confiabilidade de um elevador de passageiros submetido a inspeções periódicas seguidas de reparo ou substituição de componentes.

Talebberrouane, Khan e Lounis (2016) analisaram a disponibilidade de um sistema de *flare* incluindo um vaso de separação de líquido por meio de RdPe e de um modelo de árvore de falhas avançado concluindo que a RdPe tem uma melhor capacidade de modelagem.

Habchi e Barthod (2016) propuseram uma metodologia para análise de confiabilidade de sistemas mecatrônicos durante a fase de projeto levando em conta os componentes e suas interações além de fatores externos. Foram utilizadas redes de Petri e análise por meio de diagramas de bloco.

Hao, Zhang e Shi (2016) avaliaram a confiabilidade de um sistema de armazenamento de amostras lunares através de RdPe com níveis de complexidade crescente até a inclusão do sistema de medição e controle e a avaliação de um projeto com redundâncias.

Zeiler e Bertsche (2015) analisaram a disponibilidade de uma turbina eólica instalada no mar submetida a diferentes modos de operação e políticas de manutenção. Foi considerada a existência ou não de um estoque de sobressalentes e seus prazos de fornecimento.

Santos, Teixeira e Soares (2014) também propuseram um modelo para análise da disponibilidade de uma turbina eólica instalada no mar levando em conta aspectos logísticos como a mobilização das embarcações responsáveis pela manutenção e a janela temporal em função das condições meteorológicas.

Meyer, Kaul e Sextro (2015) analisaram a disponibilidade de uma frota de automóveis concentrando-se na análise das embreagens sujeitas a uma inspeção periódica realizada por uma equipe de manutenção.

Whiteley et Al. (2015) investigaram a confiabilidade de células de combustível, a RdPe permitiu modelar as interações entre os diferentes modos de falha além das degradações químicas.

Liu (2015) avaliou um sistema de segurança de poço submarino obtendo resultados de confiabilidade e disponibilidade para o sistema completo e para os subsistemas, avaliando separadamente a influência de subsistemas mecânicos e elétricos e por fim realizando uma análise do efeito das taxas de falha e dos tempos de reparo de cada subsistema nos resultados globais.

Garg (2013) propôs a análise de uma unidade de lavagem de uma fábrica de papel analisando as interações entre os componentes através de RdPe para determinação dos cortes mínimos.

Kleiner e Volovoi (2010) analisaram a disponibilidade e probabilidade de falha sob demanda de um controlador de um sistema de airbag automotivo por meio de uma rede de Petri estocástica. Volovoi (2004) propôs a utilização de rede de Petri colorida para modelar os efeitos de envelhecimento de equipamentos de um sistema por meio de marcas envelhecíveis que representam os equipamentos permitindo a modelagem de sistemas complexos de maneira mais enxuta.

A análise de disponibilidade de plantas *offshore* de produção de petróleo já foi abordada por alguns autores, como pôde ser verificado através de pesquisa na base de dados de resumos e citações Scopus utilizando os seguintes termos de busca: (availability OR reliability) AND (“petri net” OR “petri-net”) AND *offshore*.

Meng, Klol e Rauzy (2015) propuseram uma análise de disponibilidade de um sistema de processamento de óleo de um FPSO utilizando redes de Petri, na qual são avaliadas diferentes estratégias de manutenção e o impacto dos resultados nas curvas de produção de óleo. Zhang et al.(2014) avaliaram a disponibilidade de uma instalação submarina de um FPSO através de RdPe e seu impacto na produção de óleo. Bris (2014) avaliou uma RdPe de um sistema de produção de petróleo, levando em conta os turbogeradores, compressores e uma unidade de desidratação de gás, o estudo considera diferentes estados de falha, prioridades de reparo e níveis de produção em função a falha de equipamentos.

Observa-se que nesses trabalhos não foi realizada uma avaliação completa do sistema de tratamento de gás e seus subsistemas. Não foram abordadas as reconfigurações em função de limitações de exportação ou injeção de gás além de outros aspectos de manutenção como restrições de reparo. Além disso, de maneira geral, nos estudos realizados utilizando redes de Petri não foi realizada análise de

sensibilidade quanto aos dados de falha utilizados. O presente trabalho pretende abordar essas lacunas identificadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho propõe a utilização de uma rede de Petri estocástica para análise de confiabilidade e disponibilidade de um sistema de tratamento de gás. A Figura 3.1 ilustra um fluxograma do método adotado. Após a compreensão detalhada do sistema, suas funções e modos de operação é possível definir as hipóteses e o escopo, selecionando os subsistemas e equipamentos que farão parte do modelo de análise. A elaboração do modelo consiste na construção da RdPe para cada subsistema e em seguida na integração dessas redes de Petri para compor o modelo completo do sistema. As principais etapas para construção da RdPe do subsistema são: definir os estados do subsistema e equipamentos e relacionar com os lugares da rede; definir as condições lógicas para atingir os estados relacioná-las com as transições imediatas; definir as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos e relacioná-las com as transições probabilísticas da RdPe. Para construir a RdPe do sistema deve-se definir os estados do sistema e os lugares correspondentes; definir as condições lógicas para atingir os estados e as transições imediatas correspondentes e integrar a RdPe de cada subsistema. Por fim, realizam-se as simulações, analisam-se e discutem-se os resultados.

Figura 3.1 – Fluxograma do método.

Fonte: Autor.

3.1 MODELOS

Modelos são utilizados para auxiliar a entender a estrutura de um sistema, realizar previsões e suportar decisões. É fundamental identificar as questões que serão respondidas com o modelo, quais as fronteiras do sistema e as hipóteses realizadas. O modelo deve ser um compromisso entre aspectos detalhados do sistema e a necessidade de gerar respostas em tempos e custos adequado (LEITCH, 1995).

O escopo de análise desse trabalho é o sistema de tratamento de gás e seus subsistemas. Considera-se que todos os subsistemas estão associados em série uma vez todos devem operar que para que se obtenha gás na especificação e nível de pressão requerido a cada aplicação. Não são consideradas indisponibilidades dos demais sistemas da plataforma que possam impactar a operação do sistema de tratamento de gás, tais como o sistema de tratamento de óleo e de água e os sistemas que fornecem utilidades como energia elétrica, ar comprimido e fluídos para refrigeração. Não são consideradas indisponibilidades da malha de distribuição de gás, considera-se que durante um evento de falha da malha a unidade de produção mantém a exportação de gás e ocorre apenas um aumento admissível da pressurização dos gasodutos. Nos modelos desse trabalho não são consideradas falhas de modo comum, falhas em modo passivo ou *standby* e falhas de comutação entre os equipamentos redundantes.

A Tabela 3.1 apresenta os subsistemas e equipamentos que serão considerados na análise indicando também sua função, a quantidade total de equipamentos e a quantidade de equipamentos redundantes. Foram selecionados os equipamentos mais relevantes em termos de função desempenhada no sistema e das taxas de falha verificadas nas bases de dados. As etapas de remoção e compressão do gás rico em CO₂ foram consideradas como um subsistema único chamado “Remoção e Compressão de CO₂”. O subsistema “Compressão de injeção” pode operar em dois modos a depender da necessidade de injeção de gás, um modo em que os dois motocompressores operam em paralelo e não há equipamento redundante e outro modo em que um dos motocompressores opera e o outro permanece em *standby*.

Tabela 3.1 – Subsistemas e equipamentos do sistema (continua).

Subsistema - Sigla	Equipamento - Sigla	Quantidade total de equipamentos	Quantidade de equipamentos redundantes	Função
Compressão principal – MC (<i>Main Compression</i>)	Motor elétrico - M	3	1	Acionar o compressor.
	Compressor centrífugo - C	3	1	Elevar a pressão do gás para que ele possa ser tratado nos sistemas à jusante.
Recuperação de vapor – VRU (<i>Vapor Recovery Unit</i>)	Motor elétrico - M	1	0	Acionar o compressor.
	Compressor parafuso - C	1	0	Elevar a pressão dos gases de baixa pressão produzidos pelo processo.
Desidratação do gás – DEH (<i>Dehydration Unit</i>)	Filtro coalescedor - F	2	1	Separar o gás do líquido para evitar a condensação nas membranas.
	Torre adsorvedora – V (Vessel)	3	1	Enquadrar o volume de água no gás.
	Trocador de calor (aquecimento) – H (Heat exchanger)	1	0	Aquecer o gás de regeneração.
Ponto de orvalho – DPC (Dew Point Control)	Trocador de calor (resfriamento) – H (Heat exchanger)	2	0	Garantir uma redução da temperatura de entrada para favorecimento da condensação no separador.
	Vaso separador – V (Vessel)	1	0	Retirar o máximo de condensado para que o gás atinja o ponto de orvalho.
	Filtro coalescedor - F	2	1	Retirar gotículas de líquido em suspensão no gás.
Remoção e compressão de CO ₂ – CO ₂	Trocador de calor (aquecimento) – H (Heat exchanger)	2	0	Aquecer o gás a ser alimentado nos trens de tratamento.
	Membranas – S (Sieve)	4	0	Separar o gás numa corrente rica em CO ₂ e numa corrente de gás natural tratado pobre em CO ₂ .

Fonte: Autor.

Tabela 3.1 - Subsistemas e equipamentos do Sistema (conclusão).

Subsistema - Sigla	Equipamento - Sigla	Quantidade total de equipamentos	Quantidade de equipamentos redundantes	Função
Remoção e compressão de CO ₂ – CO ₂ /	Trocador de calor (resfriamento) – H (Heat exchanger)	1	0	Resfriar o gás natural tratado que sai das membranas.
	Turbina a gás - T	2	0	Acionar o compressor.
	Compressor centrífugo - C	2	0	Elevar a pressão da corrente de gás rica em CO ₂ para que possa ser injetado nos poços.
Compressão de exportação - EC (Exportation Compression)	Motor elétrico - M	3	1	Acionar o compressor.
	Compressor centrífugo - C	3	1	Elevar a pressão do gás para que ele possa ser exportado ou injetado.
Compressão de injeção - IC (Injection Compression)	Motor elétrico - M	2	0 ou 1	Acionar o compressor.
	Compressor centrífugo - C	2	0 ou 1	Elevar a pressão do gás para que ele possa ser injetado nos poços.

Fonte: Autor.

O diagrama de blocos correspondente é apresentado na Figura 3.2. No caso dos conjuntos de equipamentos que operam com redundância passiva ou *standby*, as setas indicam os equipamentos que se encontram em operação e os equipamentos redundantes são representados com uma conexão interrompida.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sistema.

Fonte: Autor.

São considerados três modos de operação, um modo principal e dois modos secundários em função das restrições operacionais originadas pela indisponibilidade dos subsistemas “Remoção e compressão de CO₂” e “Compressão de Injeção”. O modo de operação INJ_EXP é o modo principal no qual todos os subsistemas operam e o gás natural enquadrado quanto ao teor de CO₂ pode ser utilizado como gás combustível, *gas lift*, exportado ou injetado enquanto o gás rico em CO₂ proveniente do subsistema de CO₂ é injetado. O modo de operação INJ_ONLY é acionado em caso de indisponibilidade do subsistema “Remoção e compressão de CO₂” e os demais subsistemas operam. É realizado um *by-pass* do subsistema de CO₂ e todo o gás produzido é injetado. Nesse modo considera-se que o gás combustível será fornecido pela malha de distribuição de gás. O modo de operação EXP_ONLY é acionado em caso de indisponibilidade do subsistema “Compressão de injeção”. É realizado um *by-pass* do subsistema de CO₂ e todo o gás produzido é exportado. Nesse modo considera-se que a malha de distribuição é capaz de absorver o teor de CO₂ do gás exportado até que o subsistema de CO₂ retorne à operação. A Tabela 3.2 resume os modos de operação. Observa-se que os subsistemas “Compressão principal”, “Recuperação de vapor”, “Desidratação de gás”, “Controle de ponto de orvalho”, “Compressão de exportação” são essenciais para qualquer modo de

operação. Dessa forma a falha de qualquer subsistema dentre esses cinco leva o sistema à condição de indisponível.

Tabela 3.2 – Modos de operação do sistema.

Modo de operação	Subsistemas disponíveis	Subsistemas indisponíveis	Situação operacional
INJ_EXP	MC, VRU, DEH, DPC, CO ₂ , EC, IC	Nenhum	Exportação de gás natural. Injeção do gás rico em CO ₂ .
INJ_ONLY	MC, VRU, DEH, DPC, EC, IC	CO ₂	Injeção de todo o gás produzido.
EXP_ONLY	MC, VRU, DEH, DPC, CO ₂ , EC	IC	Exportação de todo o gás produzido.

Fonte: Autor.

Quatro modelos foram construídos nesse trabalho, o detalhamento das características de cada modelo é apresentado na Tabela 3.3.

O modelo A é um modelo reduzido considerando apenas os subsistemas “Compressão principal”, “Compressão de exportação” e “Compressão de injeção”, foi utilizado para a validação dos resultados de confiabilidade comparando-os às equações propostas na literatura. Nesse modelo considera-se que no subsistema “Compressão de injeção”, um motocompressor opera e o outro permanece em *standby*.

O modelo B é o principal, inclui todos os subsistemas apresentados na Figura 3.2 e considera os modos de operação da Tabela 3.2. Nesse modelo considera-se que no subsistema “Compressão de injeção” os dois motocompressores operam simultaneamente, sem redundância, independentemente do modo de operação.

Os modos de operação do modelo B consideram a hipótese de que não há restrições de volume de exportação de gás ou restrição do teor de CO₂ no gás exportado em caso de falha do subsistema de injeção de gás e que não há restrições de volume de gás injetado em caso de falha do subsistema “Remoção e compressão de CO₂”. Essas hipóteses podem ser consideradas na análise isolada de uma plataforma, no entanto para um conjunto de plataformas, as restrições já não podem ser ignoradas. O modelo C foi construído para avaliar a influência dessas restrições, o modelo considera um

conjunto de 4 plataformas com modos de operação restritos em função da condição operacional de cada plataforma.

Os modelos A, B e C levam em conta apenas um modo de falha, considerando as falhas do tipo críticas que levam o equipamento imediatamente ao estado fora de operação. O modelo D tem o objetivo de avaliar confiabilidade e disponibilidade considerando dois modos de falha por equipamento, um modo com falhas do tipo críticas e um modo com falhas do tipo degradadas.

Tabela 3.3 – Modelos do trabalho.

Modelo	Descrição	Avaliação	Subsistemas	Tipo de severidade de falha
A	Modelo contendo os 3 subsistemas principais para validação dos resultados de confiabilidade comparados às equações propostas na literatura	Confiabilidade e disponibilidade	MC, EC e IC	Crítica
B	Modelo principal incluindo todos os subsistemas	Confiabilidade e disponibilidade	MC, VRU, DEH, DPC, CO ₂ , EC e IC	Crítica
C	Modelo reduzido para avaliação de disponibilidade considerando um conjunto de 4 plataformas submetidas a restrições de exportação de gás	Disponibilidade	CO ₂ , IC e 1 subsistema equivalente aos subsistemas essenciais (MC/VRU/DEH/DPC/EC)	Crítica
D	Modelo para 1 dos subsistemas considerando falhas do tipo críticas e degradadas	Confiabilidade e disponibilidade	MC	Crítica e Degradada

Fonte: Autor.

3.2 DADOS DE FALHA

A seleção cuidadosa dos dados de falha a serem utilizados nas análises de confiabilidade e disponibilidade é essencial para obtenção de resultados válidos. O'Connor (2002) ressalta a importância da análise crítica dos resultados tendo em vista que os dados de falha sempre contém fontes de incerteza e variabilidade que não podem ser rigorosamente quantificados e que, além dos aspectos estatísticos, eventuais mudanças de projeto ou diferentes práticas de manutenção e operação podem fazer com que os dados de falha, provenientes de um cenário anterior do sistema, nem sempre gerem resultados plausíveis sobre o comportamento futuro desse sistema.

A coleta de dados é um aspecto fundamental e um investimento de longo prazo já que podem ser necessários vários anos para permitir que se gerem resultados de análise confiáveis. A cooperação na indústria tem se mostrado uma forma eficaz em termos de custo. Para possibilitar a coleta, o intercâmbio e a análise de dados é necessária uma padronização (ABNT ISO 14224, 2011).

A norma ABNT NBR ISO 14224:2011 (Indústrias de petróleo e gás natural - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade manutenção para equipamentos) define o método para coleta e registro dos dados de equipamentos, dados de falha e dados de manutenção. A definição clara das fronteiras dos equipamentos permite garantir o entendimento dos itens contidos e assim registrar corretamente os eventos de falha e manutenção. A norma ABNT ISO 14224:2011 apresenta as fronteiras para equipamentos típicos da indústria do petróleo. A Figura 3.3 ilustra a definição de fronteira para os compressores. A Tabela 3.4 resume os subsistemas que fazem parte do escopo dos equipamentos.

Figura 3.3 – Fronteira para compressores.

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR ISO 14224 (ABNT ISO 14224, 2011).

Tabela 3.4 - Subsistemas para os equipamentos em análise.

Motores elétricos	Compressores centrífugos	Vasos	Trocadores de calor	Turbinas a gás
Lubrificação	Lubrificação	Internos	Internos	Lubrificação
Controle e monitoramento	Controle e monitoramento	Externos	Externos	Controle e monitoramento
Resfriamento	Selagem	Controle e monitoramento	Controle e monitoramento	Partida
Motor elétrico	Caixa de transmissão	Miscelânea	Miscelânea	Admissão de combustível
	Unidade compressora			Admissão de ar
				Gerador de gás
				Turbina de potência
				Exaustão

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR ISO 14224 (ABNT ISO 14224, 2011).

O projeto OREDA (*Onshore and Offshore Reliability Data*) é gerenciado por um comitê formado por representantes de várias empresas do setor de óleo e gás e tem o objetivo de coletar e disponibilizar dados de confiabilidade para os equipamentos utilizados no setor e contribuir para segurança e custo-eficiência dos projetos e operações de exploração e produção de gás. O banco de dados OREDA-2015 apresenta dados coletados de 1993 a 2008. A partir de 2002 os participantes do projeto OREDA contribuíram nas atualizações da norma ISO 14224 e os dados passaram a seguir a taxonomia e fronteiras dessa norma (SINTEF; NTNU, 2015).

O OREDA orienta as empresas participantes do projeto de tal forma que os dados sejam coletados após uma eventual fase de mortalidade infantil e considera que os equipamentos são submetidos a manutenção ou substituição antes de atingir a fase de desgaste. Assume-se que a taxa de falha é constante e independe do tempo (SINTEF; NTNU, 2015). As taxas de falha são apresentadas com um intervalo de confiança de 90% estabelecido pelas taxas mínima e máxima que são calculadas através do tempo total em serviço e dos percentis 95% e 5% de uma distribuição qui-quadrado com n graus de liberdade correspondendo ao número de falhas observadas. Os tempos de reparo disponibilizados correspondem ao tempo efetivo de reparo, desconsiderando tempos de mobilização de pessoal, espera por material ou tempo de retorno após reparo, são apresentados o tempo médio e o tempo máximo.

O OREDA disponibiliza dados gerais e específicos para determinadas classes de equipamentos, como por exemplo dados gerais para motores elétricos e dados para motores elétricos por faixa de potência e aplicação. Foram selecionados os dados do

conjunto de equipamentos mais abrangente privilegiando dados referentes a uma maior população de equipamentos. Os dados estão agregados em função do tipo de severidade da falha que pode ser crítica, degradada ou insipiente. As falhas do tipo críticas causam perda imediata e completa da função de um equipamento, as falhas do tipo degradada são perdas parciais em que o equipamento permanece operando, no entanto, sua função não é desempenhada dentro das especificações e as falhas do tipo insipiente são aquelas que não impactam imediatamente a função do equipamento, porém, se não tratadas, podem evoluir para falhas degradadas ou críticas.

A tecnologia dos equipamentos aplicados nas unidades de tratamento de gás abordadas nesse trabalho é recente tendo em vista as capacidades de processamento, níveis de pressão, contaminantes e a evolução relacionada a materiais, instrumentação e controle. Por esse motivo os dados do OREDA podem não refletir de maneira satisfatória o comportamento de falha esperado.

Para uma análise absoluta do desempenho em confiabilidade e disponibilidade do sistema seria importante utilizar dados de falha e reparo de equipamentos similares aos existentes numa unidade típica do pré-sal e sujeitos às mesmas condições de operação e manutenção. Essas unidades são relativamente recentes e ainda não se dispõe de dados confiáveis. Para uma análise comparativa entre cenários de operação ou entre modelos com diferentes níveis de detalhamento, como é proposto nesse trabalho, considera-se que a utilização do banco de dados OREDA é satisfatória.

Nesse trabalho, para os modelos A, B e C foram consideradas as falhas do tipo críticas que impedem a continuidade operacional do equipamento e para o modelo D foram consideradas as falhas do tipo degradadas. Para os filtros coalescedores do subsistema “Desidratação de gás” são consideradas as taxas de falha disponíveis para os vasos, já que os filtros têm a mesma construção de um vaso com diferença nos componentes internos que devem afetar sobretudo as taxas de falha do tipo degradada. Os dados de taxas de falha e taxa de reparo para falhas do tipo críticas são apresentados na Tabela 3.5 e os dados para falhas do tipo degradadas são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 - Tempo médio entre falhas (MTTF) e tempo médio para reparos (MTTR) para falhas do tipo críticas.

Equipamento	MTTF (h)			MTTR (h)	
	Mínimo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Motores elétricos ¹	16093	39936	268097	24	344
Compressores centrífugos ¹	1643	4967	142450	16	232
Compressores parafusos ²	1299	7138	1000000000	23	163
Vasos ¹	7359	33190	2500000000	8	48
Trocadores de calor ¹	18355	57770	3571429	47	360
Membranas ¹	22538	34223	54585	6	11
Turbinas a gás ¹	551	1893	269542	25	504

Fonte:¹(SINTEF; NTNU, 2015), ²(SINTEF; NTNU, 2002)

Tabela 3.6 - Tempo médio entre falhas (MTTF) e tempo médio para reparos (MTTR) para falhas do tipo degradadas.

Equipamento	MTTF (h)			MTTR (h)	
	Mínimo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Motores elétricos ¹	35778	88731	591716	14	110
Compressores centrífugos ¹	2000	4855	29780	18	350

Fonte:¹(SINTEF; NTNU, 2015)

Para efeito de simplificações, pode-se determinar o tempo médio entre falhas e o tempo médio para reparo da associação em série de equipamentos utilizando-se as Equações 23 e 24 (KNEZEVIC; ODOOM, 2001) sendo λ , a taxa de falha, e MTTR o tempo médio para reparo.

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (23)$$

$$MTTR_s = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i * MTTR_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (24)$$

Para o modelo simplificado, foram calculados o MTTF e MTTR da associação em série do conjuntos motor e compressor conforme apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Tempo médio entre falhas (MTTF) e tempo médio para reparo (MTTR) para o modelo simplificado.

Equipamento	MTTF (h)			MTTR (h)	
	Mínimo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Motocompressor	1490	4418	93023	23	334

Fonte: Autor.

3.3 FERRAMENTA DE ANÁLISE

Dentre as ferramentas pesquisadas para construção e análise de redes de Petri, destacam-se os programas PIPE2 (Platform Independent Petri net Editor 2), CPN Tools 4.0 (Coloured Petri Net Tools 4.0) e TimeNET 4.3 (*timed net evaluation tool*). O TimeNET 4.3 foi desenvolvido pela universidade alemã Technische Universität Ilmenau e se mostrou a ferramenta mais adequada e versátil, com interface adequada para a construção da rede, declaração de variáveis, módulo de análise e simulação em estado estacionário e transiente.

Nesse trabalho, foi utilizado o módulo de Rede de Petri Determinística e Estocástica eDSPNs (*extended deterministic and stochastic Petri nets*) do programa TimeNET 4.3. As transições disponíveis nesse módulo estão ilustradas na Figura 3.4. As transições gerais são descritas por uma função de probabilidade que pode ser uniforme, triangular ou exponencial. É possível atribuir prioridade ou probabilidade de ocorrência às transições do tipo imediatas para resolver casos de conflito com outras transições imediatas que sejam habilitadas simultaneamente.

Figura 3.4 - Representação das transições disponíveis no programa TimeNET 4.3 módulo eDSPN. a) transição imediata, b) transição exponencial, c) transição determinística e d) transição geral.

Fonte: Autor.

As condições para habilitação de uma transição imediata podem ser construídas utilizando arcos ou funções de habilitação (*enabling functions*). A Figura 3.5 ilustra essas duas possibilidades. Na Figura 3.5 a) para que a transição imediata T1 esteja habilitada é preciso que o lugar P2 contenha uma marca e que o lugar P3 não contenha a marca. Os dois arcos ligando P2 e T1, um em cada sentido, implicam que não haverá alteração no número de marcas de P2 após o disparo da transição T1. A Figura 3.5 b) apresenta a mesma RdPe, porém nesse caso a função de habilitação de T1 descreve a condição de habilitação. Utilizando essas condições de habilitação é possível modelar as lógicas de operação do sistema, relacionando a RdPe de cada equipamento ou subsistema, criando lugares que permitam monitorar o estado de um subsistema ou equipamento e definindo as condições de partida e parada dos

equipamentos. A construção das lógicas por meio de arcos e arcos de inibição tem a vantagem de permitir uma compreensão imediata da rede ao visualizá-la, porém à medida que as lógicas se tornam mais complexas, a utilização de arcos se torna impraticável.

Figura 3.5 – Rede de Petri ilustrando condições para habilitação.

Fonte: Autor.

A política de seleção da transição a disparar no programa utilizado é do tipo pós-seleção em que são sorteados inicialmente os tempos de disparo e as transições ocorrem sequencialmente. A política de servidores adotada foi a de servidor único (exclusive server) já que no modelo não há casos de transições probabilísticas associadas a mais de um lugar de saída. A política de memória pode ser do tipo PRS (preemptive resume) ou PRD (preemptive different), por meio de análises nos modelos construídos foi observado que não há alterações de resultado em virtude da escolha de uma ou outra política de memória quando se utilizam distribuições do tipo exponenciais.

O programa dispõe de dois métodos para avaliação da RdPe, análise numérica (*analysis*) ou simulação (*simulation*). A análise numérica é uma avaliação numérica direta e exata enquanto a simulação utiliza o método de Monte Carlo ((ZIMMERMANN, 2012). No método *analysis* é possível selecionar o nível de precisão de até 1E-7. No método *simulation* deve-se selecionar o intervalo de confiança limitado a 99% e o máximo erro relativo limitado a 1%. É possível optar por uma avaliação transiente ou em regime estacionário. A avaliação transiente permite analisar o comportamento desde o estado inicial até um dado tempo, sendo utilizada para avaliar confiabilidade do sistema. A avaliação em regime estacionário analisa o desempenho médio do sistema após os efeitos dos transientes, sendo utilizada para avaliar disponibilidade.

4 MODELO A

O modelo A contém os principais subsistemas formados basicamente por equipamentos dinâmicos, os subsistemas “Compressão principal”, “Compressão exportação” e “Compressão injeção”. Os três subsistemas têm redundância do tipo *standby*, o subsistema “Compressão de injeção” tem configuração 1 de 2 enquanto os subsistemas “Compressão principal” e “Compressão de exportação” têm configuração 2 de 3. A Figura 4.1 apresenta o diagrama de blocos.

Figura 4.1 – Modelo A: diagrama de blocos.

Fonte: Autor.

4.1 MODELO DE REDUNDÂNCIA STANDBY 1 DE 2

A Figura 4.2 apresenta a RdPe para o subsistema “Compressão de injeção” com configuração 1 de 2 equipamentos reparáveis com redundância do tipo *standby* e com reparo restrito a um dos equipamentos por vez.

Os lugares **ic_up** e **ic_down** representam os estados operacional e fora de operação do subsistema. Os equipamentos podem estar nos estados *standby* (lugar **mtcp_ic_i_stb**), operacional (lugar **mtcp_ic_i_up**), fora de operação (lugar **mtcp_ic_i_down**) e em reparo (lugar **mtcp_ic_i_rep**), sendo “i” um índice que indica o equipamento A ou B. O lugar **repair_team** representa a disponibilidade da equipe de manutenção que irá realizar a manutenção corretiva nos equipamentos. Na configuração inicial ilustrada na Figura 4.2, a posição das marcas indica que o equipamento B encontra-se operacional, o equipamento A encontra-se em *standby*, o subsistema encontra-se operacional e a equipe de manutenção está disponível.

Figura 4.2 – Modelo A: RdPe para disponibilidade do subsistema “Compressão de injeção”: configuração 1 de 2 equipamentos reparáveis com redundância do tipo *standby* e 1 equipe de manutenção.

Fonte: Autor.

As transições exponenciais T131 e T1111 representam a falha dos equipamentos e a elas é atribuído o valor do MTTF para motocompressores. Essas transições levam os equipamentos do estado operacional para o estado fora de operação. As transições imediatas T531 e T5111 quando disparadas levam os equipamentos do estado fora de operação para o estado em reparo. Para que essas transições sejam habilitadas a equipe de manutenção deve estar disponível (lugar **repair_team** com uma marca). As transições exponenciais T031 e T0111 representam o reparo dos equipamentos e a elas é atribuído o valor do MTTR para motocompressores. Quando disparadas, essas transições levam os equipamentos do estado em reparo para o estado *standby* e retornam uma marca para o lugar **repair_team**, tornando a equipe de manutenção disponível para atuar em um novo reparo. As transições imediatas T231 e T2111,

quando disparadas, levam os equipamentos do estado *standby* para o estado em operação. Apenas um dos equipamentos deve operar por vez enquanto o outro permanece em *standby*; após a falha de um dos equipamentos, o outro deve passar a operar. Essa condição é criada por meio dos arcos de inibição, para que a transição T231 seja habilitada e o equipamento A passe a operar, não deve haver marca no lugar **mtcp_ic_B_up**, o que indica que o equipamento B falhou.

O subsistema está operacional quando um dos equipamentos (A ou B) opera e o subsistema está fora de operação quando os dois equipamentos não operam. A transição imediata T451, quando disparada, leva o subsistema do estado operacional (**ic_up**) para o estado fora de operação (**ic_down**). Para que a transição T451 seja habilitada, o sistema deve estar operacional (**lugar ic_up** com uma marca) e os dois equipamentos não devem estar operando (lugares **mtcp_ic_A_up** e **mtcp_ic_B_up** sem marcas). As transições imediatas T4411 e T7, quando disparadas, levam o subsistema do estado fora de operação para o estado operacional. Para que a transição T4411 seja habilitada, o sistema deve estar fora de operação (lugar **ic_down** com uma marca) e o equipamento A deve estar operando (lugar **mtcp_ic_A_up** com uma marca).

4.2 MODELO DE REDUNDÂNCIA STANDBY 2 DE 3

A Figura 4.3 apresenta a RdPe para o subsistema “Compressão principal” com configuração 2 de 3 equipamentos reparáveis com redundância do tipo *standby* e com reparo restrito a um dos equipamentos por vez. A RdPe para o subsistema “Compressão de exportação” é idêntica à RdPe para o subsistema “Compressão principal”.

Na configuração inicial ilustrada na Figura 4.3, o conjunto de marcas indica que os equipamentos A e B encontram-se operacionais, o equipamento C encontra-se em *standby*, o subsistema encontra-se operacional e a equipe de manutenção está disponível. Na configuração 2 de 3, um equipamento em *standby* deve assumir o estado operacional quando um dos outros dois equipamentos passarem do estado operacional para o estado fora de operação. Para modelar essas duas possibilidades são necessárias duas transições ligando o lugar *standby* (**mtcp_mc_i_sb**) ao lugar em operação (**mtcp_mc_i_up**). O sistema passa de operacional para fora de operação quando pelo menos dois equipamentos falham e para modelar essa

condição são necessárias três transições imediatas correspondentes às três combinações possíveis que podem levar o sistema a falha: falha de A e B (transição T4) ou falha de B e C (transição T42) ou falha de A e C (transição T41). O sistema retorna ao estado operacional quando dois equipamentos operam, para modelar essa condição são necessárias três transições imediatas para os casos em que A e B operam (transição T44), B e C operam (transição T43) e para o caso em que A e C operam (transição T45).

Figura 4.3 – Modelo A: RdPe para disponibilidade dos subsistemas “Compressão principal” e “Compressão de exportação”: configuração 2 de 3 equipamentos reparáveis com redundância do tipo *standby* e 1 equipe de manutenção.

Fonte: Autor.

4.3 MODELO DO SISTEMA

As RdPe dos três subsistemas foram integradas para construir a RdPe do sistema apresentada na Figura 4.4. Dois lugares foram criados para quantificar a disponibilidade da exportação de gás (**exp_up** e **exp_down**) e injeção de gás (**inj_up** e **inj_down**). A Tabela 4.1 mostra a descrição dos lugares e as condições para atingir cada estado.

Tabela 4.1 – Lugares, estados do sistema e dependências.

Lugares	Descrição	Dependências
exp_up	Exportação de gás disponível	Compressão principal disponível (mc_up) E Compressão exportação disponível (ec_up)
exp_down	Exportação de gás indisponível	Compressão principal indisponível (mc_down) OU Compressão exportação indisponível (ec_down)
inj_up	Injeção de gás disponível	Compressão exportação disponível (exp_up) E Compressão injeção disponível (ic_up)
inj_down	Injeção de gás indisponível	Compressão exportação indisponível (exp_down) OU Compressão injeção indisponível (ic_down)

Fonte: Autor.

Um único lugar para a equipe de manutenção (**repair_team**) é compartilhado por todos os subsistemas, o número de marcas nesse lugar representa o número de equipes disponíveis, ou seja, o número de equipamentos que podem ser reparados simultaneamente. Na condição ilustrada na Figura 4.4, uma única equipe está disponível. Para avaliar disponibilidade, o sistema deve ser reparável e, portanto, o número de equipes disponíveis no modelo deve ser igual ou superior a um; para avaliar a confiabilidade, o modelo não deve permitir que reparos sejam realizados, isso é possível tornando zero o número de marcas no lugar **repair_team**.

Figura 4.4 – Modelo A: RdPe para o sistema.

Fonte: Autor.

A disponibilidade foi obtida por meio do método análise numérica considerando o sistema em regime estacionário. A confiabilidade foi obtida através da análise transiente. A disponibilidade ou confiabilidade de um equipamento é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar correspondente ao estado operacional do equipamento. A disponibilidade ou confiabilidade para exportação de gás ou injeção de gás são medidas como o valor esperado para o número de marcas nos lugares **exp_up** e **inj_up**. A seção seguinte apresenta os resultados para os modelos dos subsistemas com configuração 1 de 2, configuração 2 de 3 e em seguida para o sistema. Ao final é realizada uma análise de sensibilidade.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A solução em estado estacionário, para obtenção de disponibilidade, atinge convergência em 143 iterações com precisão de 1E-07. A Tabela 4.2 apresenta o resultado para disponibilidade dos três subsistemas. Os dados de falha utilizados para os motocompressores dos três subsistemas são idênticos. Os subsistemas “Compressão principal” e “Compressão de exportação” têm o mesmo resultado já que a configuração também é idêntica. Observa-se que a disponibilidade do subsistema “Compressão de injeção” é superior à dos demais subsistemas, portanto a disponibilidade para a configuração *standby* 1 de 2 é superior à disponibilidade para a configuração *standby* 2 de 3 considerando os mesmos equipamentos e dados de falha.

Tabela 4.2 – Modelo A: disponibilidade para os subsistemas considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Subsistema	Disponibilidade	Indisponibilidade
Compressão principal	99,989%	0,011%
Compressão de exportação	99,989%	0,011%
Compressão de injeção	99,997%	0,003%

Fonte: Autor

A Tabela 4.3 mostra a distribuição do número médio de marcas para os equipamentos de cada subsistema. Esses valores podem ser interpretados como o percentual de tempo em cada estado, cada motocompressor do subsistema “Compressão de injeção” permanece 50% do tempo em operação enquanto cada motocompressor do subsistema “Compressão principal” permanece 66,6% do tempo em operação devido às configurações 1 de 2 e 2 de 3. Observa-se que para menores tempos médios entre

falhas (MTTF), o percentual de tempo em operação para cada equipamento individualmente cai proporcionalmente à disponibilidade para o subsistema, se a disponibilidade do subsistema “Compressão de injeção”, por exemplo, for de 80%, cada motocompressor irá operar 40% do tempo. Os resultados para a configuração 2 de 3, no entanto não atingem o valor exato de 66,6% para menores tempos médio entre falhas devido a uma limitação identificada no modelo: durante a falha de dois equipamentos, B e C por exemplo, o equipamento A permanece operando. Essa limitação não impacta os resultados para disponibilidade do subsistema que exige que dois equipamentos estejam operando. No modelo B, essa limitação é corrigida incluindo transições para representar o retorno dos equipamentos do estado em operação para o estado *standby*.

Tabela 4.3 – Modelo A: distribuição de marcas por lugar para cada subsistema considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Subsistema	Standby	Em operação	Fora de operação	Em reparo
Compressão principal	32,981%	66,663%	0,009%	0,347%
Compressão de exportação	32,981%	66,663%	0,009%	0,347%
Compressão de injeção	49,734%	49,999%	0,007%	0,260%

Fonte: Autor.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados para a disponibilidade média de exportação e de injeção de gás. A disponibilidade para injeção de gás é inferior à da exportação de gás já que o número de subsistemas em série aumenta.

Tabela 4.4 – Modelo A: disponibilidade para as demandas de gás considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Demanda	Disponibilidade	Indisponibilidade
Exportação de gás	99,978%	0,022%
Injeção de gás	99,975%	0,025%

Fonte: Autor.

Para avaliar a influência do número de equipes de manutenção na disponibilidade, foram realizadas quatro análises em estado estacionário variando o número de equipes de manutenção de 1 a 4, por meio da variação do número de marcas no lugar **repair_team**. A Figura 4.5 mostra a variação da disponibilidade em função do número de equipes, nota-se que as diferenças são insignificantes nesse caso, da ordem de

0,01%, e que para um número de equipes superior a 2 não há mudança significativa nos resultados de disponibilidade.

Figura 4.5 – Modelo A: disponibilidade em função do número de equipes de manutenção considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

A análise em estado transiente, para obtenção de confiabilidade, atinge convergência com uma precisão de $1E-07$. A solução foi calculada para 26280 horas (36 meses) com intervalo de resultado de 0,1h. A Figura 4.6 apresenta a confiabilidade no tempo para o subsistema “Compressão principal” e seus equipamentos. O motocompressor A inicia no estado *standby* enquanto os motocompressores B e C iniciam no estado operacional. Observa-se que a confiabilidade para o motocompressor A é superior à dos demais já que sua confiabilidade só reduz após o início de sua operação que ocorre na eventual falha de um dos outros dois equipamentos. A confiabilidade do subsistema inicialmente é superior à confiabilidade individual dos motocompressores B e C, porém, para tempos superiores a 8 meses, a confiabilidade do subsistema passa a ser inferior devido ao fato da confiabilidade individual de B ou C ser tão pequena que não é mais compensada pela confiabilidade do motocompressor A. A confiabilidade para o subsistema com configuração 2 de 3 calculada pela Equação 16 (RIAC, 1995) também é apresentada no gráfico e coincide com a confiabilidade obtida pelo modelo para o subsistema.

Figura 4.6 – Modelo A: confiabilidade no tempo para os subsistemas de “Compressão principal” e “Compressão de exportação” e seus equipamentos.

Fonte: Autor.

A Figura 4.7 mostra a confiabilidade no tempo para o subsistema “Compressão de injeção” e seus equipamentos. O motocompressor A inicia no estado *standby* enquanto o motocompressor B inicia operando. Observa-se que a confiabilidade para o motocompressor A é superior à do B já que sua confiabilidade só reduz após o início de sua operação que ocorre na eventual falha do B e é idêntica à confiabilidade do subsistema. A confiabilidade para o subsistema com configuração 1 de 2 calculada pela Equação 16 (LEWIS, 1994) também é apresentada e coincide com a confiabilidade obtida pelo modelo para o subsistema.

Figura 4.7 – Modelo A: confiabilidade no tempo para o subsistema “Compressão de injeção” e seus equipamentos.

Fonte: Autor.

A Figura 4.8 apresenta a confiabilidade no tempo para os três subsistemas e para exportação de gás e injeção de gás. Nota-se que a confiabilidade para injeção de gás cai rapidamente por conta da dependência dos três subsistemas, após 6 meses de operação, apesar da confiabilidade dos subsistemas ainda estar em 40%, a confiabilidade da exportação de gás e da injeção é de 17% e 2% respectivamente.

Figura 4.8 – Modelo A: confiabilidade no tempo para os subsistemas e para as demandas de exportação e injeção de gás.

Fonte: Autor.

A Figura 4.9 e a Figura 4.10 mostram uma análise de sensibilidade quanto aos dados de falha para as demandas de exportação de gás e injeção de gás. Consideram-se os tempos médios até a falha (MFFT) mínimo, médio e máximo e os tempos médios para reparo (MTTR) médio e máximo para os motocompressores. Nota-se que a variação do MTTR tem maior influência sobre os resultados de disponibilidade que a variação do MTTF. Utilizando os valores de MTTR médio, não há grande variação nos resultados de disponibilidade com a alteração dos valores de MTTF. Utilizando os valores de MTTR máximo, a alteração dos valores de MTTF implica numa grande variação nos resultados de disponibilidade. Com exceção do caso extremo (mínimo MTTF e máximo MTTR), os resultados de disponibilidade são superiores a 0,94 para exportação de gás e superiores a 0,93 para injeção de gás.

Figura 4.9 – Modelo A: disponibilidade para diferentes valores de MTTF e MTTR para a demanda de exportação de gás.

Fonte: Autor.

Figura 4.10 – Modelo A: disponibilidade para diferentes valores de MTTF e MTTR para a demanda de injeção de gás.

Fonte: Autor.

A Figura 4.11 mostra a variação da disponibilidade em função do número de equipes considerando o caso extremo (MTTF mínimo e MTTR máximo). Nota-se que as diferenças são significativas nesse caso, a disponibilidade para injeção de gás aumenta em cerca de 90% com o aumento do número de equipes de manutenção de 1 para 2.

Figura 4.11 – Modelo A: disponibilidade em função do número de equipes de manutenção considerando os valores de MTTF mínimo e MTTR máximo.

Fonte: Autor.

5 MODELO B

5.1 MODELO DO SISTEMA

O modelo completo é formado por todos os subsistemas apresentados no diagrama de blocos da Figura 3.2 e na lista de subsistemas e equipamentos apresentada na Tabela 3.1.

A grande quantidade de equipamentos e relações lógicas a serem modeladas inviabiliza a utilização exclusiva de arcos para construir as condições de habilitação das transições imediatas como foi feito no modelo simplificado. Para o modelo completo foram utilizadas as funções de habilitação.

Para modelar os estados dos equipamentos e subsistemas são utilizadas as duas RdPe elementares apresentadas na Figura 5.1 (a) e (b).

Figura 5.1 – Modelo B: RdPe elementar para equipamentos e RdPe elementar para subsistemas.

Fonte: Autor.

A Figura 5.1 (a) apresenta um exemplo da RdPe utilizada para cada equipamento. Da mesma forma que na RdPe do modelo A, o equipamento pode estar nos estados *standby* (lugar **mot_mc_A_stb**), operacional (lugar **mot_mc_A_up**), fora de operação (lugar **mot_mc_A_down**) e em reparo (lugar **mot_mc_A_rep**). As transições exponenciais T83 e T85 estão associadas ao MTTF e ao MTTR respectivamente. A transição imediata T84 é habilitada em função da disponibilidade da equipe de manutenção e leva o equipamento do estado fora de operação para o estado em reparo. A transição imediata T86 permite a partida do equipamento somente se o subsistema tiver equipamentos disponíveis em quantidade suficiente e se os subsistemas dos quais seja dependente estiverem disponíveis. A transição imediata

T4 retorna um equipamento do estado operacional para o estado *standby* nos casos de falha em determinada quantidade de equipamentos em seu subsistema ou por falha de outros subsistemas dos quais seja dependente. Dessa forma foi possível resolver a limitação identificada no modelo simplificado no qual para a configuração 2 de 3, o equipamento A poderia permanecer operando mesmo em caso de falha de B e C.

A Figura 5.1 (b) ilustra um exemplo da RdPe para modelar o estado de cada subsistema. O subsistema pode estar operacional (lugar **mc_up**), fora de operação (lugar **mc_down**) ou em *standby* (lugar **mc_stb**). A transição imediata T46 leva o subsistema ao estado fora de operação em caso de falha em determinada quantidade de equipamentos a depender da configuração de equipamentos. A transição imediata T59 retorna o subsistema para o estado *standby* desde que haja quantidade suficiente de equipamentos disponíveis. A transição imediata T57 permite a partida do subsistema desde que os subsistemas dos quais esse é dependente estejam disponíveis. A transição imediata T45 retorna o subsistema para o estado *standby* se algum dos subsistemas dos quais esse seja dependente estiverem indisponíveis.

Além da RdPe para cada equipamento e subsistema, é utilizada uma RdPe auxiliar, ilustrada na Figura 5.2, que identifica a disponibilidade ou indisponibilidade dos cinco subsistemas essenciais para o funcionamento do sistema completo: “Compressão principal” (MC), “Recuperação de vapor” (VRU), “Desidratação de gás” (DEH), “Ponto de orvalho” (DPC) e “Compressão de exportação” (EC). A rede é formada por dois lugares **mc_vru_deh_dpc_ec_OK** e **mc_vru_deh_dpc_ec_NOK**. A função de habilitação da transição imediata T46111 verifica se alguns dos subsistemas encontram-se fora de operação e em caso afirmativo leva a marca ao lugar NOK, a marca retorna ao lugar OK por meio da transição imediata T60111 quando todos os subsistemas citados estiverem operacionais. A partida de qualquer equipamento só ocorre quando o número de marcas no lugar **mc_vru_deh_dpc_ec_OK** for igual a 1 e quando o número de marcas no lugar **mc_vru_deh_dpc_ec_OK** for igual a 0, o equipamento retorna ao estado *standby*. Essa condição é inserida nas redes básicas de cada equipamento, nas funções de habilitação das transições imediatas para a partida e retorno ao estado *standby*.

Figura 5.2 – Modelo B: RdPe para disponibilidade dos subsistemas essenciais.

Fonte: Autor.

A Figura 5.3 ilustra a RdPe para o subsistema “Desidratação de gás” e seus equipamentos. A Tabela 5.1 apresenta, como exemplo, as funções de habilitação para algumas transições imediatas do subsistema “Desidratação de gás”. As RdPe para os demais subsistemas são apresentadas no Apêndice A e as funções de habilitação são apresentadas no Apêndice B.

Figura 5.3 – Modelo B: RdPe para o subsistema “Desidratação de gás”.

Fonte: Autor.

Tabela 5.1 – Modelo B: transições da RdPe para o subsistema “Desidratação de gás”.

Lugar de entrada-> lugar de saída	Transição	Função de habilitação
ft_deh_A_stb --> ft_deh_A_up	T8611	#ft_deh_B_up=0 AND (#ves_deh_A_up + #ves_deh_B_up + #ves_deh_C_up + #ves_deh_A_stb + #ves_deh_B_stb + #ves_deh_C_stb)>1 AND (#he_deh_up+#he_deh_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ft_deh_A_up --> ft_deh_A_stb	T7	(#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)>1 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ves_deh_A_stb --> ves_deh_A_up	T862	((#ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)=1 OR (#ves_deh_B_stb + #ves_deh_C_stb)>0) AND (#ft_deh_A_up+#ft_deh_B_up)>0 AND (#he_deh_up+#he_deh_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ves_deh_A_up --> ves_deh_A_stb	T6	(#ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)=2 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_down + #ft_deh_B_rep)=2 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
he_deh_stb --> he_deh_up	T0	(#ves_deh_A_up + #ves_deh_B_up + #ves_deh_C_up)=2 AND (#ft_deh_A_up + #ft_deh_B_up)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
he_deh_up --> he_deh_stb	T21	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1 OR (#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)>1 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_down + #ft_deh_B_rep)>1;
ft_deh_A_down --> ft_deh_A_rep	T8411	(#mot_mc_A_rep + #mot_mc_B_rep + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_A_rep + #comp_mc_B_rep + #comp_mc_C_rep + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_rep + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep + #he_deh_rep + #he1_dpc_A_rep + #he1_dpc_B_rep + #sep_dpc_rep + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_rep + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_rep + #he2_co2r_rep + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_rep + #mot_ec_A_rep + #mot_ec_B_rep + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_A_rep + #comp_ec_B_rep + #comp_ec_C_rep + #mot_ic_A_rep + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_A_rep + #comp_ic_B_rep) < rep_teams;
ft_deh_A_down --> ft_deh_A_rep	T8811	
ves_deh_A_down --> ves_deh_A_rep	T842	
ves_deh_A_down --> ves_deh_A_rep	T882	
ves_deh_A_down --> ves_deh_A_rep	T922	
he_deh_down --> he_deh_rep	T3	
deh_stb --> deh_up	T572	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
deh_up --> deh_stb	T452	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
deh_up --> deh_down	T462	(#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)>1 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_B_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep)>1 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1;
deh_down --> deh_stb	T592	(#ves_deh_A_stb + #ves_deh_B_stb + #ves_deh_C_stb)>1 AND (#ft_deh_A_stb + #ft_deh_B_stb)>0 AND #he_deh_stb=1;

Fonte: Autor.

A transição T862, por exemplo, leva o equipamento “torre adsorvedora” A do estado *standby* (lugar **ves_deh_A_stb**) para o estado operacional (lugar **ves_deh_A_up**). A transição é habilitada sob quatro condições:

- apenas um dos vasos B e C está fora de operação ou pelo menos um dos vasos B e C está em *standby* ($(\#ves_deh_B_down + \#ves_deh_B_rep + \#ves_deh_C_down + \#ves_deh_C_rep)=1$ OR $(\#ves_deh_B_stb + \#ves_deh_C_stb)>0$);
- pelo menos um dos filtros A e B está operacional ou em *standby* $(\#ft_deh_A_up+\#ft_deh_B_up+\#ft_deh_A_stb+\#ft_deh_B_stb)>0$;
- o trocador de calor está operacional ou em *standby* $(\#he_deh_up+\#he_deh_stb)=1$;
- os cinco subsistemas essenciais estão operacionais $(\#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0)$.

Figura 5.4 – Modelo B: RdPe para os modos de operação do sistema.

Fonte: Autor.

A RdPe da Figura 5.4 identifica a disponibilidade ou indisponibilidade do sistema e seus modos de operação de acordo com a Tabela 3.2. O sistema inicia no modo de operação e lugar correspondente **inj_exp** com todos os subsistemas disponíveis e exportação e injeção do gás produzido. Se houver falha do subsistema “Remoção e compressão de CO₂”, a RdPe atinge o lugar **inj_only** correspondente ao modo de operação no qual há injeção de todo o gás produzido. Se houver falha do subsistema “Compressão de injeção”, a rede atinge o lugar **exp_only** correspondente ao modo de operação no qual há exportação de todo o gás produzido. Se houver falha de um dos cinco subsistemas essenciais ou falha simultânea do subsistema “Remoção e compressão de CO₂” e do subsistema injeção de gás, a rede atinge o lugar **shutdown** correspondente a indisponibilidade do sistema. A Tabela 5.2 apresenta as funções de

habilitação das transições imediatas que permitem que o sistema transite entre os diferentes estados.

Tabela 5.2 – Modelo B: transições da RdPe para os modos de operação do sistema.

Lugar de entrada -> lugar de saída	Transição	Função de habilitação
inj_exp --> inj_only	T27	#co2_down=1
inj_only --> inj_exp	T33	#co2_down=0
inj_only --> shutdown	T29	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1 OR #ic_down=1
shutdown --> inj_only	T35	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #ic_down=0 AND #co2_down=1
shutdown --> inj_exp	T30	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #ic_down=0 AND #co2_down=0
inj_exp --> shutdown	T31	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1 OR (#co2_down + #ic_down)=2
inj_exp --> exp_only	T9	#ic_down=1
exp_only --> inj_exp	T28	#ic_down=0
exp_only --> shutdown	T32	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1
shutdown --> exp_only	T34	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #ic_down=1

Fonte: Autor.

A RdPe para o modelo completo integra as redes de Petri de cada um dos sete subsistemas, a RdPe para disponibilidade dos subsistemas essenciais (Figura 5.2) e a RdPe para os modos de operação do sistema (Figura 5.4). A rede totaliza 187 lugares, 160 transições imediatas e 80 transições exponenciais.

A seção seguinte apresenta os resultados para o modelo B. Foi verificado que para uma RdPe com um número elevado de lugares e transições, o método de análise numérica não é suportado no programa TIMENET. Por esse motivo, para o modelo B foi utilizado o método de simulação. A disponibilidade foi obtida por meio do método de simulação em estado estacionário, a confiabilidade foi obtida através do método de simulação transiente. A disponibilidade ou confiabilidade de um equipamento é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar correspondente ao estado operacional do equipamento. A disponibilidade ou confiabilidade para exportação de gás e/ou injeção de gás são medidas como o valor esperado para o número de marcas nos lugares **inj_exp** e **inj_only** e **exp_only**. A condição de falha ou indisponibilidade total do sistema é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar **shutdown**.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A solução em estado estacionário, para obtenção da disponibilidade, atinge convergência para um intervalo de confiança de 99% e máximo erro relativo de 1%. A Tabela 5.3 apresenta os resultados de disponibilidade para os três modos de operação e na condição de falha. Os valores podem ser interpretados como a distribuição ou o percentual de tempo em cada modo de operação e na condição de falha.

Tabela 5.3 – Modelo B: percentual de tempo nos modos de operação e na condição de falha considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Modos de operação e falha	Subsistemas indisponíveis	Situação operacional	Lugar	Percentual de tempo
INJ_EXP	Nenhum	Exportação de gás natural. Injeção do gás rico em CO ₂ .	inj_exp	95,72%
INJ_ONLY	CO2	Injeção de todo o gás produzido.	inj_only	3,42%
EXP_ONLY	IC	Exportação de todo o gás produzido.	exp_only	0,75%
Falha	1 dos essenciais OU (CO2 E IC)	Indisponibilidade total	shutdown	0,65%

Fonte: Autor.

A Tabela 5.4 mostra os valores de indisponibilidade para cada subsistema e o valor esperado para o lugar **mc_vru_deh_dpc_ec_NOK** que representa a indisponibilidade de qualquer um dos subsistemas essenciais. Observa-se que os sistemas com maiores indisponibilidades são o subsistema de “Remoção e compressão de CO₂” e o subsistema “Compressão de injeção”. A indisponibilidade do subsistema “Remoção e compressão de CO₂” é cerca de quatro vezes superior à indisponibilidade do subsistema “Compressão de injeção” o que está em acordo com o observado para as disponibilidades dos modos de operação INJ_ONLY e EXP_ONLY apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.4 – Modelo B: indisponibilidade para os subsistemas considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Subsistema	Lugar	Indisponibilidade
Subsistemas essenciais	mc_vru_deh_dpc_ec_NOK	0,68%
Compressão principal	mc_down	0,01%
Recuperação de vapor	vru_down	0,40%
Desidratação de gás	deh_down	0,08%
Ponto de orvalho	dpc_down	0,19%
Compressão de exportação	ec_down	0,01%
Remoção e compressão de CO ₂	co2_down	3,58%
Compressão de injeção	ic_down	0,80%

Fonte: Autor.

Para avaliar a influência do número de equipes de manutenção na disponibilidade, foram realizadas quatro análises em estado estacionário variando o número de equipes de manutenção de 1 a 4, por meio de uma variável chamada *repair_teams*. A Figura 5.5 mostra a variação da disponibilidade em função do número de equipes para os sistemas essenciais (lugar **mc_vru_dpc_ec_OK**) e para o modo de operação principal INJ_EXP. A Figura 5.6 apresenta a variação da disponibilidade em função do número de equipes para os modos de operação INJ_ONLY e EXP_ONLY e para a condição de falha.

Figura 5.5 – Modelo B: disponibilidade para os subsistemas essenciais e para o modo de operação INJ_EXP em função do número de equipes de manutenção considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

Figura 5.6 – Modelo B: percentual do tempo nos modos de operação INJ_ONLY, EXP_ONLY e na condição de falha em função do número de equipes de manutenção considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

Nota-se que há uma flutuação no resultado de disponibilidade para o modo de operação INJ_EXP, na Figura 5.5, e que de maneira geral as diferenças entre os resultados obtidos, Figura 5.5 e Figura 5.6, são pequenas e de ordem inferior ao erro oriundo da simulação (1% para um intervalo de confiança de 99%). Como o funcionamento do sistema depende dos cinco subsistemas essenciais, após a falha de um desses subsistemas, os demais subsistemas são levados ao estado *standby*. Por esse motivo não haverá muitas falhas simultâneas no sistema, o que pode explicar as pequenas diferenças observadas com o aumento do número de equipes de manutenção.

A solução transiente, para obtenção da confiabilidade, foi calculada para 8760 horas (12 meses) para um intervalo de confiança de 99% e 1% de erro máximo. A probabilidade de falha do sistema está associada à condição de falha e ao lugar **shutdown** da RdPe para os modos de operação. O resultado da probabilidade de falha e a correspondente confiabilidade do sistema no tempo é mostrado na Figura

5.7. A partir de cerca de 180 dias a confiabilidade é de cerca de 15% e para cerca de 365 dias atinge um valor inferior a 2%.

Figura 5.7 – Modelo B: probabilidade de falha e confiabilidade do sistema no tempo considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

O resultado de confiabilidade em função do tempo para o modo de operação principal INJ_EXP é mostrado na Figura 5.8. A partir de cerca de 45 dias a confiabilidade é de cerca de 10% e para cerca de 100 dias atinge um valor muito próximo a 0%.

Figura 5.8 – Modelo B: confiabilidade no tempo para o modo de operação INJ_EXP considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

Em caso de falha de um subsistema, as reconfigurações levam os equipamentos dos demais subsistemas a condição de *standby*, por esse motivo, a confiabilidade para cada subsistema deve ser analisada separadamente utilizando a respectiva RdPe. A Figura 5.9 apresenta os resultados de confiabilidade para cada um dos subsistemas. Observa-se que o subsistema “Remoção e compressão de CO₂” (CO₂) é o de menor confiabilidade, isso se deve à quantidade de equipamentos superior aos demais e à presença de turbinas a gás que são os equipamentos com o menor valor de MTTF conforme pode ser observado na Tabela 3.5.

Figura 5.9 – Modelo B: confiabilidade no tempo para os subsistemas considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

A seguir são apresentadas análises de sensibilidade quanto aos dados de falha nos resultados de disponibilidade e confiabilidade do sistema e seus subsistemas. Nas primeiras análises, os valores de MTTF e MTTR de cada equipamento foram variados simultaneamente para verificar os casos extremos. Em seguida, os valores de MTTF e MTTR de cada equipamento foram variados de maneira isolada para avaliar a influência de um determinado dado de falha sobre o subsistema em que está instalado e sobre os demais subsistemas.

A Figura 5.10 e a Figura 5.11 mostram uma análise de sensibilidade quanto aos dados de falha para o resultado de disponibilidade do modo de operação principal INJ_EXP e para a indisponibilidade do sistema. Consideram-se os tempos médios até a falha (MFFT) mínimo, médio e máximo e os tempos médios para reparo (MTTR) médio e máximo para todos os equipamentos simultaneamente. Nota-se que a variação do MTTR tem maior influência sobre os resultados de disponibilidade que a variação do MTTF. Utilizando os valores de MTTR médio, os resultados de disponibilidade variam de 0,86 a 0,99 com a alteração dos valores de MTTF, utilizando os valores de MTTR máximo, os resultados variam de 0,14 a 0,98 com a alteração dos valores de MTTF.

Figura 5.10 – Modelo B: disponibilidade do modo de operação INJ_EXP considerando diferentes valores de MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

Figura 5.11 – Modelo B: indisponibilidade do sistema considerando diferentes valores MTTF e MTTR.

Fonte: Autor.

A Figura 5.12 apresenta os resultados de disponibilidade do modo de operação INJ_EXP em função da variação do MTTF entre os valores mínimo, médio e máximo

para cada equipamento mantendo os valores médios de MTTF para os demais equipamentos. O valor central é o de disponibilidade obtido com os valores médios de MTTF, cada curva é relacionada a variação do MTTR para um equipamento. Desprezando as variações inferiores a 1% (erro máximo) em relação ao valor médio, observa-se que há variação significativa de disponibilidade para os dados de MTTF de compressores centrífugos e de turbinas a gás. Os compressores centrífugos são os equipamentos em maior quantidade no sistema e as turbinas a gás são os equipamentos com o menor valor de MTTF.

Figura 5.12 – Modelo B: disponibilidade do modo de operação INJ_EXP adotando-se os valores mínimo, médio e máximo de MTTF para cada equipamento isoladamente.

Fonte: Autor.

A Figura 5.13 apresenta os resultados de disponibilidade do modo de operação INJ_EXP em função da variação do MTTR entre os valores médio e máximo para cada equipamento mantendo os valores médios de MTTR para os demais equipamentos. O valor central é o de disponibilidade obtido com os valores médios de MTTR, cada curva é relacionada a variação do MTTR para um equipamento. Não foi observada variação significativa da disponibilidade com os valores máximos de MTTR para vasos, filtros e membranas. Esses equipamentos apresentam os menores valores de MTTR máximo conforme pode ser observado na Tabela 3.5. Os menores valores de

disponibilidade são obtidos para os valores máximos de MTTR para turbina a gás e compressores centrífugos. Os compressores centrífugos são os equipamentos em maior quantidade no sistema e as turbinas a gás são os equipamentos com o maior valor de MTTR conforme pode ser observado na Tabela 3.5.

Figura 5.13 – Modelo B: disponibilidade do modo de operação INJ_EXP adotando-se os valores médio e máximo de MTTR para cada equipamento isoladamente.

Fonte: Autor.

A Tabela 5.5 apresenta a variação de indisponibilidade de cada subsistema quando se variam os valores de MTTF ou MTTR do compressor centrífugo e da turbina mantendo os valores médios de MTTF e MTTR para os demais equipamentos. Tomando como exemplo a variação dos dados para o compressor centrífugo, observa-se que quando utilizado o menor valor de MTTR, há um aumento na indisponibilidade dos subsistemas MC, EC, CO₂ e IC nos quais há compressores centrífugos e não há variação significativa na indisponibilidade dos subsistemas VRU, DEH e DPC, nos quais não há compressores centrífugos. Quando utilizado o maior valor de MTTR para o compressor centrífugo, há um aumento na indisponibilidade de todos os subsistemas. Esses resultados mostram que a variação do MTTF de um certo equipamento tem pouca influência nos subsistemas nos quais esse equipamento não está instalado, porém, o aumento do MTTR ocasiona um aumento na indisponibilidade de todos os subsistemas.

Tabela 5.5 – Modelo B: indisponibilidade para os subsistemas adotando-se diferentes valores de MTTF e MTTR para o compressor centrífugo e para a turbina.

Subsistema	MTTF e MTTR médios	Compressor centrífugo			Turbina		
		MTTF mínimo	MTTF máximo	MTTR máximo	MTTF mínimo	MTTF máximo	MTTR máximo
MC	0,000	0,001	0,000	0,012	0,000	0,000	0,010
VRU	0,004	0,005	0,006	0,017	0,004	0,004	0,028
DEH	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,004
DPC	0,002	0,002	0,002	0,007	0,002	0,002	0,011
EC	0,000	0,001	0,000	0,012	0,000	0,000	0,010
CO2	0,037	0,049	0,030	0,170	0,092	0,010	0,364
IC	0,008	0,023	0,001	0,105	0,009	0,008	0,064

Fonte: Autor.

A influência do valor de MTTR de um único equipamento na indisponibilidade de todos os subsistemas pode ser explicada pela restrição de reparos simultâneos, se o tempo para reparo de um equipamento for muito longo e houver uma única equipe de manutenção a disponibilidade de todos os subsistemas será afetada. A Figura 5.14 apresenta uma análise da indisponibilidade para os subsistemas “Recuperação de vapor” (VRU), “Desidratação de gás” (DEH) e “Controle de ponto de orvalho” (DPC) nos quais não há compressor centrífugo instalado, utilizando o valor máximo de MTTR dos compressores centrífugos e variando o número de equipes de manutenção. Verifica-se que para um número de equipes de manutenção maior que 2, a indisponibilidade dos subsistemas VRU, DEH e DPC tende ao resultado utilizando o valor médio de MTTR. Conclui-se que com o aumento do número de equipes de manutenção a variação do MTTR de um equipamento deixa de influenciar a indisponibilidade dos subsistemas nos quais esse equipamento não está instalado.

Figura 5.14 – Modelo B: indisponibilidade para os subsistemas VRU, DEH e DPC com a variação do número de equipes de manutenção.

Fonte: Autor.

A Figura 5.15 apresenta uma análise de sensibilidade quanto aos dados de falha para o resultado da probabilidade de falha do sistema no tempo adotando-se os valores mínimo, médio e máximo de MTTF para todos os equipamentos simultaneamente. Observa-se que há grande variação nos resultados, em cerca de 90 dias a probabilidade de falha é de 1% adotando-se os valores de MTTF máximo e de 95% adotando-se os valores de MTTF mínimo.

Figura 5.15 – Modelo B: probabilidade de falha do sistema no tempo adotando-se os valores mínimo, médio e máximo de MTTF para todos os equipamentos simultaneamente.

Fonte: Autor.

A Figura 5.16 mostra o resultado de confiabilidade no tempo para o modo de operação principal INJ_EXP adotando-se os valores mínimo, médio e máximo de MTTF para todos os equipamentos simultaneamente. O período considerado nesse caso foi de 182 dias, a partir de cerca de 30 dias a confiabilidade considerando os valores de MTTF mínimo é inferior a 1%.

Figura 5.16 – Modelo B: confiabilidade no tempo para o modo de operação INJ_EXP adotando-se os valores mínimo, médio e máximo de MTTF para todos os equipamentos simultaneamente.

Fonte: Autor.

A Figura 5.17 apresenta a variação da confiabilidade no tempo para o modo de operação INJ_EXP utilizando os valores de MTTF mínimo ou máximo de um determinado equipamento e mantendo os valores de MTTF médio para os demais equipamentos. A confiabilidade é superior ao valor médio de confiabilidade quando se utilizam os valores de MTTF máximos. Nota-se variação significativa da confiabilidade para os dados de falha da turbina e do compressor centrífugo. Em 45 dias enquanto a confiabilidade do sistema considerando os valores de MTTF médio para todos os equipamentos é cerca de 10%, a confiabilidade do sistema considerando o valor de MTTF máximo da turbina é de 35% e considerando o valor de MTTF mínimo da turbina, a confiabilidade é menor que 1%.

Figura 5.17 – Modelo B: confiabilidade no tempo para o modo de operação INJ_EXP adotando-se valores mínimo e máximo de MTTF para cada equipamento isoladamente.

Fonte: Autor.

5.2.1 Índice de utilização de gás

A disponibilidade e confiabilidade do sistema de tratamento de gás impactam o índice de utilização do gás definido pela Equação 1. Além do volume de queima de segurança em condição normal, a cada evento de falha do sistema de tratamento de gás, um volume de gás será enviado para o sistema de queima durante a despressurização e durante a repartida do sistema. A disponibilidade influencia diretamente o volume de gás produzido enquanto a confiabilidade do sistema e a taxa de falha influencia o volume de gás queimado. Para se estimar o índice de utilização do gás associado com base nos resultados obtidos para o modelo B, propõe-se calcular o volume total de gás produzido por meio da Equação 25, multiplicando o volume da capacidade de produção, V_{cap} , pela disponibilidade, A . O volume de gás queimado é calculado por meio da soma do volume de queima de segurança e do volume de queima associado às falhas conforme Equação 26, sendo V_{seg} o volume de queima de segurança diário, N_d o número de dias do período considerado, A

disponibilidade, V_{fal} o volume de queima associado ao evento de falha e N_f o número de falhas ocorridas no período considerado.

$$V_{pro} = V_{cap} * A \quad (25)$$

$$V_{que} = V_{seg} * N_d * A + V_{fal} * N_f \quad (26)$$

Foi considerada uma unidade típica com capacidade de produção de gás de 4,5 milhões de normais metros cúbicos por dia, com um volume de queima de segurança em condição normal de 50 mil metros cúbicos por dia e um volume de queima de 500 mil normais metros cúbicos associado a cada evento de falha para depressurização e repartida do sistema. Os valores de disponibilidade para o sistema foram obtidos pelo complemento dos valores de indisponibilidade apresentados na Figura 5.11 para os valores mínimo, médio e máximo de MTTF e valores médio e máximo de MTTR. O número de falhas foi estimado pela taxa de falha calculada por meio de uma aproximação exponencial para as curvas de probabilidade de falha do sistema apresentadas na Figura 5.15 para MTTF mínimo, médio e máximo.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados de estimativa do IUGA em função dos valores de MTTF mínimo, médio e máximo, mantendo o valor médio de MTTR. Nota-se que a variação do IUGA é de cerca de 0,4%, o que representa uma diferença de aproximadamente 5,3 milhões de metros cúbicos de gás queimado no período de 1 ano.

Tabela 5.6 – Modelo B: estimativa do índice de utilização do gás para um período de 1 ano considerando o valor médio de MTTR e os valores mínimo, médio e máximo de MTTF.

Valores de MTTF	Mínimo	Médio	Máximo
Valores de MTTR	Médio		
Capacidade - V_{cap} (10^6 Nm ³)	1642,50		
Disponibilidade - A	96,21%	99,35%	99,99%
Gás produzido - V_{pro} (10^6 Nm ³)	1580,22	1631,82	1642,29
Volume de queima de segurança - V_{que} (10^6 Nm ³)	17,56	18,13	18,25
Falhas por período - N_f	12,17	4,10	0,11
Volume de queima por falha - V_{fal} (10^6 Nm ³)	0,5		
Volume de queima associado às falhas - $V_{fal} * N_f$ (10^6 Nm ³)	6,09	2,05	0,06
Volume de queima total - V_{que} (10^6 Nm ³)	23,64	20,18	18,30
IUGA	98,50%	98,76%	98,89%

Fonte: Autor.

Na Tabela 5.7 são mostrados os resultados de estimativa do IUGA em função dos valores de MTTF mínimo, médio e máximo quando adota-se o valor máximo de MTTR. Nesse caso, como os valores de disponibilidade para valores mínimo e médio de MTTF são muito baixos (37% e 78%), o volume de gás produzido e o volume de queima de segurança são pequenos. Dessa forma nota-se que, apesar do maior valor de IUGA para o MTTF máximo, o volume de gás queimado é superior em cerca de 5,5 milhões de metros cúbicos.

Observa-se que os valores estimados para o IUGA estão acima de 97%, atendendo o limite de queima estabelecido pela ANP que é de 3% e próximos à média do IUGA nacional apresentada na Figura 2.4.

Tomando os dados dos últimos 6 meses de operação (de agosto de 2017 a janeiro de 2018) de uma unidade em fase de comissionamento com um sistema de tratamento de gás similar ao proposto nesse modelo, observa-se que a disponibilidade média do sistema de tratamento de gás foi de 95,6% considerando apenas manutenções corretivas e que o IUGA foi de 88,5%. O baixo índice de utilização de gás é justificado por conta das limitações operacionais nas fases de comissionamento das unidades compressoras. Os dados brutos não podem ser divulgados devido à confidencialidade.

Tabela 5.7 – Modelo B: estimativa do índice de utilização do gás para um período de 1 ano considerando o valor máximo de MTTR e os valores mínimo, médio e máximo de MTTF.

Valores de MTTF	Mínimo	Médio	Máximo
Valores de MTTR		Máximo	
Capacidade - V_{cap} (10^6 m³)		1642,50	
Disponibilidade - A	36,70%	77,53%	99,81%
Gás produzido - V_{pro} (10^6 m³)	602,81	1273,49	1639,36
Volume de queima de segurança - V_{que} (10^6 m³)	6,70	14,15	18,22
Falhas por período - N_f	12,17	4,10	0,11
Volume de queima por falha - V_{fal} (10^6 m³)		0,5	
Volume de queima associado às falhas - $V_{fal} \cdot N_f$ (10^6 m³)	6,09	2,05	0,06
Volume de queima total - V_{que} (10^6 m³)	12,78	16,20	18,27
IUGA	97,88%	98,73%	98,89%

Fonte: Autor.

6 MODELO C

6.1 MODELO

O modelo C é formado por um conjunto de 4 plataformas que operam sujeitas a restrições de exportação e injeção de gás. Os modos de operação de cada plataforma são apresentados na Tabela 6.1. A primeira restrição é imposta no modo de operação INJ_ONLY, acionado em caso de indisponibilidade do subsistema “Remoção e compressão de CO₂”. Nesse modo a plataforma injeta todo o gás produzido, porém considera-se a restrição de que apenas uma das plataformas pode estar operando nesse modo devido a limitações de injeção no reservatório. A segunda restrição é imposta no modo de operação EXP_ONLY, acionado em caso de indisponibilidade do subsistema “Compressão de injeção”. Nesse modo a plataforma exporta todo o gás produzido, porém considera-se a restrição de que apenas uma das plataformas pode estar operando nesse modo devido a limitações de capacidade de escoamento no gasoduto e limitações quanto ao teor de CO₂ no gás exportado.

Tabela 6.1 – Modelo C: modos de operação para o conjunto de plataformas.

Modo de operação	Subsistemas disponíveis	Subsistemas indisponíveis	Restrição	Situação operacional
INJ_EXP	Essenciais, CO ₂ , IC	Nenhum	Nenhuma	Exportação de gás natural. Injeção do gás rico em CO ₂ .
INJ_ONLY	Essenciais, IC	CO ₂	Demais plataformas do conjunto não devem estar no modo inj_only	Injeção de todo o gás produzido.
EXP_ONLY	Essenciais, CO ₂	IC	Demais plataformas do conjunto não devem estar no modo exp_only	Exportação de todo o gás produzido.

Fonte: Autor.

Para conferir maior flexibilidade ao modelo, a RdPe para o sistema de cada plataforma foi simplificada quando comparada à RdPe do modelo B. No modelo C, a RdPe de

cada plataforma é composta por uma RdPe para o subsistema “Remoção e compressão de CO2” (CO2), uma RdPe para o subsistema “Compressão de injeção” (IC), uma RdPe para a disponibilidade dos cinco subsistemas essenciais e uma RdPe para os modos de operação do sistema. O modelo do sistema para uma plataforma é apresentado na Figura 6.1. O modelo para o conjunto de 4 plataformas é mostrado na Figura 6.2.

Figura 6.1 – Modelo C: RdPe para uma plataforma.

Fonte: Autor.

A RdPe para os subsistemas CO2 e IC é similar à RdPe do modelo B para um equipamento (Figura 5.1 (a)) e considera 4 estados. Para o subsistema CO2 têm-se os estados *standby* (lugar **P1_co2_stb**), operacional (lugar **P1_co2_up**), fora de operação (lugar **P1_co2_down**) e em reparo (lugar **P1_co2_rep**). As transições exponenciais T0 e T1 estão associadas ao MTTF e ao MTTR respectivamente. A transição imediata T9 leva o equipamento do estado fora de operação para o estado em reparo e é habilitada em função da disponibilidade da equipe de manutenção. A transição imediata T10 permite a partida do equipamento somente se os subsistemas essenciais estiverem disponíveis. A transição imediata T6 retorna um equipamento do estado operacional para o estado *standby* nos casos de falha dos subsistemas essenciais. A RdPe para os subsistemas essenciais considera 3 estados: operacional

(lugar **P1_mc_vu_deh_dpc_ec_up**), fora de operação (lugar **P1_mc_vu_deh_dpc_ec_down**) e em reparo (lugar **P1_mc_vu_deh_dpc_ec_rep**). As transições exponenciais T4 e T5 estão associadas ao MTTF e MTTR respectivamente. A transição imediata T12 leva o equipamento do estado fora de operação para o estado em reparo e é habilitada em função da disponibilidade da equipe de manutenção.

Figura 6.2 – Modelo C: RdPe para o conjunto de 4 plataformas.

Fonte: Autor.

A RdPe para os modos de operação é similar à RdPe do modelo B (Figura 5.4) e identifica a disponibilidade ou indisponibilidade do sistema e seus modos de operação. A Tabela 6.2 apresenta as funções de habilitação das transições imediatas que permitem que o sistema transite entre os diferentes modos de operação e a condição

de falha de acordo com as restrições apresentadas na Tabela 6.1. As funções de habilitação para as demais transições imediatas da RdPe são apresentadas no Apêndice C.

Tabela 6.2 – Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas da RdPe para os modos de operação do sistema da plataforma 1.

Lugar de entrada-> lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P1_inj_exp --> P1_inj_only	T14	$(\#P1_co2_down + \#P1_co2_rep)=1 \text{ AND } (\#P2_inj_only + \#P3_inj_only + \#P4_inj_only)=0;$
P1_inj_only --> P1_inj_exp	T16	$(\#P1_co2_down + \#P1_co2_rep)=0;$
P1_inj_only --> P1_shutdown	T20	$(\#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep + \#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down)=1 \text{ OR } (\#P1_ic_down + \#P1_ic_rep)=1;$
P1_shutdown --> P1_inj_only	T19	$(\#P1_ic_down + \#P1_ic_rep)=0 \text{ AND } (\#P1_co2_down + \#P1_co2_rep)=1 \text{ AND } (\#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down + \#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0 \text{ AND } (\#P2_inj_only + \#P3_inj_only + \#P4_inj_only)=0;$
P1_shutdown --> P1_inj_exp	T21	$(\#P1_ic_down + \#P1_ic_rep)=0 \text{ AND } (\#P1_co2_down + \#P1_co2_rep)=0 \text{ AND } (\#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down + \#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0;$
P1_inj_exp --> P1_shutdown	T22	$(\#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down + \#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1 \text{ OR } ((\#P1_ic_down + \#P1_ic_rep)=1 \text{ AND } (\#P2_exp_only + \#P3_exp_only + \#P4_exp_only)>0) \text{ OR } ((\#P1_co2_down + \#P1_co2_rep)=1 \text{ AND } (\#P2_inj_only + \#P3_inj_only + \#P4_inj_only)>0);$
P1_inj_exp --> P1_exp_only	T13	$(\#P1_ic_down + \#P1_ic_rep)=1 \text{ AND } (\#P2_exp_only + \#P3_exp_only + \#P4_exp_only)=0;$
P1_exp_only --> P1_inj_exp	T15	$(\#P1_ic_down + \#P1_ic_rep)=0;$
P1_exp_only --> P1_shutdown	T17	$(\#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down + \#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1;$
P1_shutdown --> P1_exp_only	T18	$(\#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down + \#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0 \text{ AND } (\#P1_ic_down + \#P1_ic_rep)=1 \text{ AND } (\#P2_exp_only + \#P3_exp_only + \#P4_exp_only)=0;$

Fonte: Autor.

Os valores de MTTF e MTTR para os subsistemas são apresentados na Tabela 6.3 e foram selecionados de modo que a disponibilidade e confiabilidade fosse igual àquela obtida no modelo B. Por meio das curvas de confiabilidade obtidas para cada subsistema no modelo B (apresentada na Figura 5.9), foi obtido um valor de MTTF através do ajuste de uma curva exponencial. Por meio do valor de MTTF e dos valores de indisponibilidade obtida para cada subsistema no modelo B (apresentados na Tabela 5.4) foi calculado um valor de MTTR.

Tabela 6.3 – Modelo C: valores de MTTF e MTTR para os subsistemas.

Subsistemas	MTTF	MTTR
Subsistemas essenciais	1200	8
“Remoção e compressão de CO ₂ ”	605	22
“Compressão de injeção”	2209	18

Fonte: Autor.

A seção seguinte apresenta os resultados para o modelo C. Primeiramente foram realizadas análises considerando 1 plataforma, os resultados foram comparados aos obtidos por meio do modelo B. Em seguida foram realizadas análises comparando disponibilidade e confiabilidade para 1 plataforma e para o conjunto de 4 plataformas. A disponibilidade foi obtida por meio de análise numérica em estado estacionário, a confiabilidade foi obtida através do método de análise numérica transiente. A disponibilidade ou confiabilidade de um equipamento é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar correspondente ao estado operacional do equipamento. A disponibilidade ou confiabilidade para exportação de gás e/ou injeção de gás são medidas como o valor esperado para o número de marcas nos lugares **inj_exp** e **inj_only** e **exp_only**. A condição de falha ou indisponibilidade total do sistema é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar **shutdown**.

6.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A solução em estado estacionário, para obtenção de disponibilidade, atinge convergência em cerca de 50 iterações com precisão de 1E-07. A Tabela 6.4 mostra os resultados para cada modo de operação e para condição de falha para o modelo C considerando uma plataforma comparando com os resultados obtidos por meio do modelo B (Tabela 5.3). Verifica-se que os resultados são equivalentes.

Tabela 6.4 – Modelo C: percentual de tempo nos modos de operação e na condição de falha para o modelo B e para o modelo C considerando uma plataforma.

Modo de operação e falha	Modelo B	Modelo C - 1 plataforma
INJ_EXP	95,72%	95,10%
INJ_ONLY	3,42%	3,30%
EXP_ONLY	0,75%	0,80%
Falha	0,65%	0,70%

Fonte: Autor.

A solução transiente, para obtenção da confiabilidade, foi calculada para 8760 horas (12 meses). A Figura 6.3 apresenta o comparativo entre o resultado obtido para o

modelo C considerando 1 plataforma e para o modelo B. Verifica-se que os resultados são próximos o que valida o modelo C como uma simplificação do modelo B.

Figura 6.3 – Modelo C: confiabilidade no tempo para o modelo B e para o modelo C considerando uma plataforma.

Fonte: Autor.

A Tabela 6.5 mostra os resultados de disponibilidade para cada modo de operação e para condição de falha para o modelo C considerando duas situações: plataforma operando isolada e plataforma operando no conjunto. Na situação plataforma operando isolada, uma falha dos subsistemas CO2 ou IC leva a plataforma a operar nos modos secundários INJ_ONLY ou EXP_ONLY. Na situação plataforma operando no conjunto, a plataforma está sujeita às restrições de no máximo uma plataforma operando no modo INJ_ONLY e uma plataforma operando no modo EXP_ONLY, dessa forma, após uma falha dos subsistemas CO2 ou IC a plataforma somente irá operar nos modos secundários se não houver outra plataforma do conjunto nesses modos, caso contrário irá para a condição de falha. Os valores podem ser interpretados como a distribuição ou o percentual de tempo em cada modo de operação e na condição de falha. Observa-se que as restrições de importação e exportação impostas para o conjunto de 4 plataformas não acarretam impacto na disponibilidade do modo de operação INJ_EXP, porém alteram a distribuição para os modos EXP_ONLY e INJ_ONLY e aumentam o percentual de tempo na condição de falha de 0,7% para 0,9%.

Tabela 6.5 – Modelo C: percentual de tempo nos modos de operação e na condição de falha para uma plataforma operando isolada e para uma plataforma operando no conjunto.

Modo de operação	Modelo C – Plataforma operando isolada	Modelo C – Plataforma operando no conjunto
INJ_EXP	95,10%	95,10%
INJ_ONLY	3,30%	3,20%
EXP_ONLY	0,80%	0,80%
Falha	0,70%	0,90%

Fonte: Autor.

A solução transiente, para obtenção da confiabilidade, foi calculada para 8760 horas (12 meses). O resultado de confiabilidade no tempo de uma plataforma para o modo de operação INJ_EXP é mostrado na Figura 6.4 para as duas situações: uma plataforma operando isolada e uma plataforma operando no conjunto. Na Figura 6.5 é apresentada a probabilidade de falha no tempo de uma plataforma também para as duas situações. Observa-se que as restrições de importação e exportação impostas para o conjunto de 4 plataformas não acarretam impacto na confiabilidade do modo de operação INJ_EXP porém a probabilidade de falha é superior para uma plataforma operando no conjunto desde o tempo zero até cerca de 100 dias quando as diferenças passam a ser inferiores a 1%.

Figura 6.4 – Modelo C: confiabilidade no tempo para o modo de operação INJ_EXP para uma plataforma operando isolada e para uma plataforma operando no conjunto.

Fonte: Autor.

Figura 6.5 – Modelo C: probabilidade de falha no tempo para uma plataforma considerando uma plataforma operando isolada e uma plataforma operando no conjunto.

Fonte: Autor.

Por meio do modelo C é possível avaliar a disponibilidade e confiabilidade para o conjunto de plataformas. Na Tabela 6.6, os valores apresentados são os percentuais de tempo em que um número de plataformas permanece em cada modo de operação. Observa-se, por exemplo, que durante aproximadamente 81,6% do tempo, 4 plataformas estão operando no modo principal INJ_EXP e que durante cerca de 96,4% do tempo, nenhuma plataforma está na condição de falha. Devido à restrição de que apenas uma plataforma opere nos modos de operação EXP_ONLY e INJ_ONLY, o percentual de tempo em que duas ou mais plataformas permanecem nesses modos é zero.

Tabela 6.6 – Modelo C: percentual de tempo em que um número de plataformas permanece em cada modo de operação e na condição de falha.

Modos de operação e condição de falha	Número de plataformas em cada modo				
	4	3	2	1	0
INJ_EXP	81,63%	17,00%	1,33%	0,05%	6E-06
INJ_ONLY	0,00%	0,00%	0,00%	3,25%	96,75%
EXP_ONLY	0,00%	0,00%	0,00%	12,88%	87,12%
Falha	<1e-7	5E-06	0,06%	3,54%	96,40%

Fonte: Autor.

A Figura 6.6 apresenta a confiabilidade no tempo para o conjunto considerando o modo de operação principal, trata-se da probabilidade de 4 plataformas estarem simultaneamente no modo de operação INJ_EXP. Observa-se que a confiabilidade do conjunto cai rapidamente e que em cerca de 7 dias já é inferior à 15%. A Figura 6.7

mostra a probabilidade de falha do conjunto, trata-se da probabilidade de 4 plataformas estarem simultaneamente na condição de falha. Observa-se nesse caso que a probabilidade de falha do conjunto é baixa e só atinge 90% em cerca de 180 dias de operação.

Figura 6.6 – Modelo C: confiabilidade no tempo de 4 plataformas estarem operando no modo INJ_EXP.

Fonte: Autor.

Figura 6.7 – Modelo C: probabilidade no tempo de 4 plataformas estarem em falha.

Fonte: Autor.

7 MODELO D

7.1 MODELO

O modelo D é formado pelo subsistema “Compressão principal” e considera dois modos de falha por equipamento, um modo com falhas do tipo críticas e um modo com falhas do tipo degradadas.

Para modelar os estados dos equipamentos e do subsistema são utilizadas as duas RdPe elementares apresentadas na Figura 7.1 (a) e (b).

Figura 7.1 – Modelo D: RdPe elementar para equipamentos e RdPe para o subsistema.

Fonte: Autor.

A Figura 7.1 (a) apresenta a RdPe para o motor A. O equipamento pode estar nos estados *standby* (lugar **mot_mc_A_stb**), operacional (lugar **mot_mc_A_up**), degradado (lugar **mot_mc_A_deg**), em reparo após falha degradada (lugar **mot_mc_A_rep_deg**), fora de operação (lugar **mot_mc_A_down**) e em reparo após falha crítica (lugar **mot_mc_A_rep_crt**). As transições exponenciais T83 e T1 estão associadas ao MTTF do modo de falha crítico e ao MTTF do modo de falha degradado respectivamente. A transição exponencial T2 está associada ao MTTF da falha do equipamento que opera no modo degradado. As transições exponenciais T85 e T6 estão associadas ao MTTR a partir do estado fora de operação e a partir do estado degradado respectivamente.

Considera-se que os equipamentos operam no modo degradado apenas se não houver outro equipamento redundante que possa assumir seu lugar. A partir do modo

degradado o equipamento pode ser reparado ou falhar. Considera-se que o MTTF da falha a partir do estado degradado é igual ao MTTF da falha crítica a partir do estado operacional. No modelo, os motores A e B iniciam no estado operacional e o motor C inicia no estado *standby*. O motor A irá operar em modo degradado apenas se o motor C não estiver disponível e quando o equipamento C entrar em operação, o motor A irá para o estado em reparo. Na Figura 7.1, a transição imediata T3 leva o equipamento do estado degradado para o estado em reparo após falha degradada e é habilitada quando o equipamento redundante passar a operar e em função da disponibilidade da equipe de manutenção. A transição imediata T0 leva o equipamento do estado fora de operação para o estado em reparo após falha crítica e é habilitada em função da disponibilidade da equipe de manutenção. A transição imediata T86 permite a partida do equipamento somente se o subsistema tiver equipamentos disponíveis em quantidade suficiente. A transição imediata T4 retorna um equipamento do estado operacional para o estado *standby* nos casos de falha em determinada quantidade de equipamentos em seu subsistema.

A Figura 7.1 (b) apresenta a RdPe para modelar os estados do subsistema. O subsistema pode estar operacional (lugar **mc_up**) ou fora de operação (lugar **mc_down**). A transição imediata T46 leva o subsistema ao estado fora de operação em caso de falha em determinada quantidade de equipamentos. A transição imediata T59 retorna o subsistema para o estado operacional desde que haja quantidade suficiente de equipamentos disponíveis.

A RdPe para o modelo D é mostrada na Figura 7.2. As funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema são apresentadas no APÊNDICE D.

A seção seguinte apresenta os resultados para o modelo D. A disponibilidade foi obtida por meio de análise numérica em estado estacionário, a confiabilidade foi obtida através do método de análise numérica transiente. A disponibilidade ou confiabilidade de um equipamento é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar correspondente ao estado operacional do equipamento. A disponibilidade ou confiabilidade para o subsistema é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar **mc_up**. A condição de falha ou indisponibilidade do subsistema é medida como o valor esperado para o número de marcas no lugar **mc_down**.

de falha e o resultado obtido por meio do modelo B, apresentado na Tabela 5.4 que considera apenas o modo de falha crítico. Observa-se que não há diferença significativa considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Tabela 7.1 – Modelo D: disponibilidade para o subsistema “Compressão principal” considerando valores médios de MTTF e MTTR.

	Disponibilidade	Indisponibilidade
Modelo B – 1 modo de falha	99,990%	0,010%
Modelo D – 2 modos de falha	99,994%	0,006%

Fonte: Autor

A solução transiente, para obtenção da confiabilidade, foi calculada para 8760 horas (12 meses). A Figura 7.3 mostra o resultado de confiabilidade no tempo obtida para o modelo B, já apresentado no gráfico da Figura 5.9 o resultado obtido para o modelo D. Observa-se que não há diferença significativa considerando os valores médios de MTTF e MTTR.

Figura 7.3 – Modelo D: confiabilidade para o subsistema “Compressão principal” considerando valores médios de MTTF.

Fonte: Autor.

Para avaliar a influência do número de equipes de manutenção na disponibilidade, foram realizadas três análises em estado estacionário variando o número de equipes de manutenção de 1 a 3, por meio da variável chamada *repair_teams*. A Tabela 7.2 mostra que não há variação significativa para um número de equipes maior que 2.

Tabela 7.2 – Modelo D: disponibilidade para o subsistema “Compressão principal” em função do aumento no número de equipes de manutenção considerando valores médios de MTTF e MTTR.

Número de equipes de manutenção	Disponibilidade
1	99,988%
2	99,994%
3	99,994%

Fonte: Autor.

A seguir são apresentadas análises de sensibilidade quanto aos dados de falha nos resultados de disponibilidade e confiabilidade do subsistema. A primeira análise verifica a influência isolada do valor de MTTF para falha do equipamento a partir do estado degradado, associada às transições exponenciais T2, T21, T22, T211, T221 e T2111 mostradas na Figura 7.2. Nas demais análises os valores de MTTF e MTTR de cada equipamento foram variados simultaneamente para verificar os casos extremos.

Na Tabela 7.3 verificam-se os resultados de disponibilidade quando são variados os valores de MTTF para a falha do equipamento a partir do estado degradado mantendo-se os demais valores médios de MTTF e MTTR. A primeira linha apresenta o resultado considerando os valores médios. Nota-se que não há variação significativa nos resultados.

Tabela 7.3 – Modelo D: disponibilidade para o subsistema “Compressão principal” para diferentes valores de MTTF para a falha do equipamento a partir do estado degradado.

Equipamento	Dados de falha	Disponibilidade
Todos	MTTF e MTTR médios	99,988%
Compressor centrífugo	MTTF mínimo	99,988%
Compressor centrífugo	MTTF máximo	99,988%
Motor elétrico	MTTF mínimo	99,988%
Motor elétrico	MTTF máximo	99,988%

Fonte: Autor.

Na Figura 7.4 são apresentados os resultados de confiabilidade no tempo quando são variados os valores de MTTF para a falha do equipamento a partir do estado degradado mantendo-se os demais valores médios de MTTF. Observa-se que a variação da confiabilidade comparada à curva de MTTF médio é pequena. Os valores mínimo e máximo do MTTF do compressor apresentam maior influência sobre a confiabilidade do que os valores de MTTF do motor elétrico, isso se deve aos valores absolutos de MTTF do compressor centrífugo que podem ser verificados na Tabela 3.5. Conclui-se que escolha do valor de MTTF a ser adotado a partir do estado degradado tem pouca influência nos resultados de disponibilidade e confiabilidade.

Figura 7.4 – Modelo D: confiabilidade no tempo para o subsistema “Compressão principal” considerando diferentes valores de MTTF para a falha do equipamento a partir do estado degradado.

Fonte: Autor.

A Tabela 7.4 apresenta os resultados de disponibilidade do subsistema quando se variam simultaneamente os valores de MTTF do motor e do compressor. Verifica-se que o menor valor de disponibilidade é obtido adotando-se o valor de MTTR máximo e o valor de MTTF mínimo. Assim como observado para os modelos A e B, na Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 5.10 e Figura 5.11, nota-se que a variação do MTTR tem maior influência sobre os resultados de disponibilidade que a variação do MTTF.

Tabela 7.4 – Modelo D: disponibilidade para o subsistema “Compressão principal” considerando diferentes valores de MTTF e MTTR.

Dados de falha	MTTF mínimo	MTTF médio	MTTF máximo
MTTR médio	99,905%	99,988%	100,000%
MTTR máximo	84,277%	96,950%	99,979%

Fonte: Autor.

A Tabela 7.5 apresenta os resultados de disponibilidade obtidos por meio da RdPe para o subsistema “Compressão principal” do modelo B e do modelo D considerando o valor mínimo de MTTF e máximo de MTTR para os equipamentos. Nesse caso verifica-se que o modelo D gera um resultado de disponibilidade menor.

Tabela 7.5 – Modelo D: disponibilidade para o subsistema “Compressão principal” considerando o valor mínimo de MTTF e valor máximo de MTTR.

	Disponibilidade	Indisponibilidade
Modelo B – 1 modo de falha	92,547%	7,453%
Modelo D – 2 modos de falha	84,277%	15,723%

Fonte: Autor.

A Figura 7.5 apresenta os resultados de confiabilidade no tempo quando se varia simultaneamente os valores de MTTF do motor e do compressor. São apresentados também os resultados de confiabilidade obtidas através do modelo B para comparação. Assim como observado para os valores médios de MTTF na Figura 7.3, nota-se que não há variação significativa entre o modelo B e D mesmo adotando-se valores mínimos e máximos de MTTF.

Conclui-se que a inclusão de um modo de falha ao modelo não implica em variação significativa dos resultados de confiabilidade e que nos resultados de disponibilidade a variação passa a ser significativa quando adotam-se pequenos valores de MTTF e grandes valores de MTTR.

Figura 7.5 – Modelo D: confiabilidade no tempo para o subsistema “Compressão principal” considerando diferentes valores de MTTF.

Fonte: Autor.

8 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foram construídos quatro modelos utilizando redes de Petri estocásticas para analisar a confiabilidade e disponibilidade de um sistema de tratamento de gás de uma unidade *offshore* de produção.

O modelo A, composto dos três subsistemas de compressão, permitiu avaliar e comparar o comportamento dos equipamentos com diferentes tipos de redundância *standby*, validar os resultados de confiabilidade obtidos através das equações propostas na literatura e obter valores preliminares de disponibilidade para as demandas de exportação de gás e injeção de gás.

O modelo B é o principal, inclui os sete subsistemas definidos no escopo do trabalho, agregando os equipamentos mais relevantes em termos de função desempenhada e taxas de falha. Permitiu considerar as dependências entre os equipamentos de um subsistema e entre os subsistemas além de modelar os diferentes modos de operação do sistema por meio das funções de habilitação da RdPe. Com base nos resultados de confiabilidade e disponibilidade obtidos para o modelo B foi possível estimar o índice de utilização do gás associado. Verifica-se que a variação no índice é pequena, porém representa uma diferença considerável de volume de gás queimado no período de 1 ano.

Foi avaliada a influência do número de equipes de manutenção disponíveis nos resultados de disponibilidade do sistema e de seus subsistemas. Observa-se que não há grande variação nos resultados adotando-se os valores médios para os dados de falha devido às dependências entre os subsistemas e às reconfigurações que implicam que não ocorram muitas falhas simultâneas. Quando se utilizam valores máximos de MTTR para um único equipamento nota-se que há influência significativa na disponibilidade de todos os subsistemas, isso ocorre porque se o tempo para reparo de um equipamento for muito longo e houver uma única equipe de manutenção a disponibilidade de todos os subsistemas é afetada.

A análise de sensibilidade quanto aos dados de falha foi realizada primeiramente variando simultaneamente os valores de MTTF e MTTR de cada equipamento e em seguida variando os valores de cada equipamento de forma isolada. Nos resultados de disponibilidade, observa-se influência preponderante do MTTR pois adotando-se pequenos valores de MTTR verifica-se que a variação do MTTF tem pouca influência

nos resultados. Nota-se variação significativa nos resultados para os dados de falha dos compressores centrífugos e turbinas a gás por conta da quantidade de equipamentos no sistema e dos valores absolutos de MTTF e MTTR desses equipamentos.

A facilidade de construção do modelo A sugere sua utilização em etapas preliminares de projeto para validar o arranjo inicial, as quantidades de equipamentos e as configurações de redundância. A construção do modelo B necessita da definição completa do sistema, é sugerida sua utilização após a etapa de detalhamento do projeto para identificar os subsistemas e equipamentos que mais contribuem para as falhas do sistema, e para realizar previsões quanto aos modos de operação do sistema. A influência observada dos dados de falha nos resultados de disponibilidade e confiabilidade indica a necessidade de se atualizar o modelo com dados de falha característicos da unidade que se deseja analisar para obtenção de resultados mais confiáveis. Ressalta-se a importância de manter bons registros de manutenção, especialmente quanto aos tempos de reparo que são mais sensíveis às condições e estratégias de manutenção de cada unidade industrial.

O modelo C foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência de restrições de exportação e injeção de gás. Permitiu comparar os resultados para uma plataforma operando isolada e uma plataforma operando num conjunto e sujeita às restrições, além de permitir avaliar a confiabilidade e disponibilidade do conjunto de plataformas operando simultaneamente em determinado modo de operação. Conclui-se que as restrições de importação e exportação não acarretam impacto na disponibilidade e confiabilidade para o modo de operação principal, porém a indisponibilidade e a probabilidade de falha do sistema são ligeiramente superiores para a plataforma operando no conjunto. A RdPe simplificada proposta para uma plataforma fornece resultados de confiabilidade e disponibilidade equivalentes àqueles obtidos por meio do modelo B.

O modelo D foi construído para um dos subsistemas, incluindo um modo de falha e um estado de operação degradado para os equipamentos, com o objetivo de comparar os resultados com aqueles obtidos no modelo B. Conclui-se que a inclusão de um modo de falha ao modelo não implica em variação significativa dos resultados de confiabilidade e que nos resultados de disponibilidade a variação passa a ser significativa quando adotam-se pequenos valores de MTTF e grandes valores de

MTTR. Nota-se também que a escolha do valor de MTTF a ser adotado para a falha a partir do estado degradado tem pouca influência nos resultados de disponibilidade e confiabilidade.

A utilização de redes de Petri estocásticas para análise de confiabilidade e disponibilidade mostra-se ser adequada para modelar sistemas com diferentes subsistemas, configurações e modos de operação podendo representar situações como reconfiguração de equipamentos após a falha de algum subsistema, modos de falha distintos e restrições de manutenção associada a atuação simultânea de um número de equipes de manutenção. Os modelos desenvolvidos nesse trabalho para subsistemas com configurações N de k podem ser facilmente integrados para criar modelos de outros sistemas tendo em vista que essa configuração é muito comum na indústria offshore. A construção das redes de Petri estocásticas exige uma compreensão detalhada do funcionamento do sistema em análise o que também pode destacado como uma vantagem, contribuindo para aquisição de conhecimento acerca do sistema e dando segurança quanto à fidelidade do modelo criado.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Coleta de dados de falha de equipamentos característicos de uma determinada unidade e utilização desses dados para análise dos modelos desenvolvidos;
- Modelagem de falhas em modo comum, falhas em modo passivo e falhas de comutação entre equipamentos redundantes;
- Utilização de distribuições de Weibull nas transições estocásticas e modelagem de eventos de manutenção preventiva e inspeção periódica nos equipamentos;
- Análise de restrições de manutenção relacionadas a tempos de fornecimento de sobressalentes e mobilização de equipe especializada;
- Avaliação e estudo comparativo de novos arranjos de equipamentos para os subsistemas;
- Análise de outros sistemas de uma unidade de produção *offshore* tais como sistema de tratamento de óleo, sistema de tratamento de água e sistemas de utilidades. Integração dos modelos desenvolvidos para estimativa de índices de desempenho globais de uma unidade;
- Coleta de dados de falha da malha de distribuição de gás e utilização para análise do modelo desenvolvido para um conjunto de plataformas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14224**: Indústrias de petróleo e gás natural - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos. Rio de Janeiro, 2011.

ANP, **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/boletins-anp>>. Acesso em: 11 fev. 2018.

ANP, **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Produtos regulados: Gás Natural. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/gas-natural>>. Acesso em: 02 out.2017.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Portaria ANP Nº 249, de 1º de novembro 2000 – **Diário Oficial da União** 3 de novembro 2000 - Regulamento Técnico de Queimas e Perdas de Petróleo e Gás Natural. 2000.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Portaria ANP Nº 100, de 20 de junho de 2000 - **Diário Oficial da União** 21 de junho de 2000 - Regulamento Técnico do Programa Anual Produção - PAP. 2000.

BRIS, R. **Assessment of the availability of an offshore installation by stochastic petri net modeling**. Communications 1/2014, 2014

DIAZ, M. (ED.). **Petri Nets Fundamental Models, Verification and Applications**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

GARG, H. Reliability analysis of repairable systems using Petri nets and vague Lambda-Tau methodology. **ISA Transactions**, v. 52, n. 1, p. 6–18, 2013.

GHOSH, S.; GHOSH, D.; MOHANTA, D. K. Electrical Power and Energy Systems Impact assessment of reliability of phasor measurement unit on situational awareness using generalized stochastic Petri nets. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 93, p. 75–83, 2017.

GONÇALVES, P.; SOBRAL, J.; FERREIRA, L. A. Unmanned aerial vehicle safety assessment modelling through petri Nets. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 167, n. June 2016, p. 383–393, 2017.

HABCHI, G.; BARTHOD, C. An overall methodology for reliability prediction of mechatronic systems design with industrial application. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 155, p. 236–254, 2016.

HAO, Z.; ZHANG, X.; SHI, J. The Reliability Model of the Lunar Samples Storage Installation based on GSPN. **IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems**, p. 388–392, 2016.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook (Volume1)**. Upper Saddle River: DEStech Publications, Inc., 2002.

KLEYNER, A.; VOLOVOI, V. Application of Petri nets to reliability prediction of occupant safety systems with partial detection and repair. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 95, n. 6, p. 606–613, 2010.

KNEZEVIC, J.; ODOOM, E. R. Reliability modelling of repairable systems using Petri nets and fuzzy Lambda-Tau methodology. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 73, p. 1–17, 2001.

LEITCH, R. D. **Reliability Analysis for Engineers: An Introduction**. New York: Oxford University Press, 1995.

LEWIS, E. E. **Introduction to Reliability Engineering**. Second ed. Evanston: John Wiley & Sons, 1994.

LIU, Z. et al. Application of Petri nets to performance evaluation of subsea blowout preventer system. **ISA Transactions**, v. 54, p. 240–249, 2015.

MENG, H.; RAUZY, A. Production availability modeling of FPSO system using Stochastic Petri Nets. **Taylor & Francis Group**, n. Hse 2003, p. 2271–2279, 2015.

MEYER, T.; KAUL, T.; SEXTRO, W. Advantages of reliability-adaptive system operation for maintenance planning. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 21, p. 940–945, 2015.

MODARRES, M. **What every engineer should know about Reliability and Risk analysis**. New York: CRC Press, 1993.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered Maintenance**. Woburn: Industrial Press Inc., 1999.

MURATA, T. Petri Nets : Properties, Analysis and Applications. **Proceedings of IEEE**,

v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.

O'CONNOR, P. D. T.; KLEINER, A. **Practical Reliability Engineering**. Chichester: Sons, John Wiley &, 2002.

RIAC, Reliability Information Analysis Center. Reliability Toolkit: Commercial Practices Edition. 1995

SANTOS, F. P.; TEIXEIRA, A. P.; GUEDES SOARES, C. Influence of logistic strategies on the availability and maintenance costs of an offshore wind turbine. **Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon**, p. 791–799, 2014.

SINTEF, NTNU. OREDA: Offshore Reliability Data Handbook, 4th ed, 2002.

SINTEF, NTNU. OREDA: Offshore Reliability Data Handbook, 6th ed, 2015.

SONG, H.; LIU, J.; SCHNIEDER, E. Validation , veri fi cation and evaluation of a Train to Train Distance Measurement System by means of Colored Petri Nets. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 164, n. January, p. 10–23, 2017.

TALEBBERROUANE, M.; KHAN, F.; LOUNIS, Z. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Availability analysis of safety critical systems using advanced fault tree and stochastic Petri net formalisms. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 44, p. 193–203, 2016.

VILEINISKIS, M.; REMENYTE-PRESCOTT, R. Quantitative risk prognostics framework based on Petri Net and Bow-Tie models. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 165, n. February, p. 62–73, 2017.

VOLOVOI, V. Modeling of system reliability Petri nets with aging tokens. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 84, n. 2, p. 149–161, 2004.

WHITELEY, M. et al. Advanced reliability analysis of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells using Petri-Net analysis and fuel cell modelling techniques. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 35, p. 11550–11558, 2015.

ZEILER, P.; BERTSCHE, B. Availability modelling and analysis of an offshore wind turbine using Extended Coloured Stochastic Petri Nets. **Safety and Reliability: Methodology and Applications - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2014**, p. 1157–1165, 2015.

ZHANG, H. et al. Piecewise Deterministic Markov Processes based approach applied

to an offshore oil production system. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 126, p. 126–134, 2014.

ZIMMERMANN, A. Modeling and evaluation of stochastic Petri nets with TimeNET 4.1. **2012 6th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS)**, p. 54–63, 2012.

APÊNDICE A – MODELO B: RDPE PARA OS SUBSISTEMAS

Figura A.1 - Modelo B: RdPe para o subsistema “Compressão principal”.

Fonte: Autor.

Figura A.2 - Modelo B: RdPe para o subsistema “Recuperação de vapor”.

Fonte: Autor.

Figura A.3 – Modelo B: RdPe para o subsistema “Ponto de orvalho”.

Fonte: Autor.

Figura A.4 – Modelo B: RdPe para o subsistema “Remoção e compressão de CO₂”.

Fonte: Autor.

Figura A.5 – Modelo B: RdPe para o subsistema “Compressão de exportação”.

Fonte: Autor.

Figura A.6 – Modelo B: RdPe para o subsistema “Compressão de injeção”.

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – MODELO B: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS

Tabela B.1 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Compressão principal” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_mc_A_down → mot_mc_A_rep	T84	$\begin{aligned} &(\#mot_mc_A_rep + \#mot_mc_B_rep + \#mot_mc_C_rep \\ &+ \#comp_mc_A_rep + \#comp_mc_B_rep + \#comp_mc_C_rep + \\ &\#mot_vru_rep + \#comp_vru_rep + \#ves_deh_A_rep + \\ &\#ves_deh_B_rep + \#ves_deh_C_rep + \#ft_deh_A_rep + \\ &\#ft_deh_B_rep + \#he_deh_rep + \#he_dpc_A_rep + \\ &\#he_dpc_B_rep + \#sep_dpc_rep + \#ft_dpc_A_rep + \\ &\#ft_dpc_B_rep + \#he1_co2r_A_rep + \#he1_co2r_B_rep + \\ &\#ms1_co2r_A_rep + \#ms1_co2r_B_rep + \#ms1_co2r_C_rep + \\ &\#ms1_co2r_D_rep + \#he2_co2r_rep + \#turb_co2c_A_rep + \\ &\#turb_co2c_B_rep + \#comp_co2c_A_rep + \\ &\#comp_co2c_B_rep + \#mot_ec_A_rep + \#mot_ec_B_rep + \\ &\#mot_ec_C_rep + \#comp_ec_A_rep + \#comp_ec_B_rep + \\ &\#comp_ec_C_rep + \#mot_ic_A_rep + \#mot_ic_B_rep + \\ &\#comp_ic_A_rep + \#comp_ic_B_rep) < rep_teams; \end{aligned}$
comp_mc_A_down →	T841	
comp_mc_A_rep		
mot_mc_B_down → mot_mc_B_rep	T88	
comp_mc_B_down →	T881	
comp_mc_B_rep		
mot_mc_C_down → mot_mc_C_rep	T92	
comp_mc_C_down →	T921	
comp_mc_C_rep		
mot_mc_A_up → mot_mc_A_stb	T4	$\begin{aligned} &(\#comp_mc_A_down + \#comp_mc_A_rep)=1 \text{ OR} \\ &(((\#mot_mc_B_down + \#mot_mc_B_rep + \#comp_mc_B_down \\ &+ \#comp_mc_B_rep)>0 \text{ AND } (\#mot_mc_C_down + \\ &\#mot_mc_C_rep + \#comp_mc_C_down + \\ &\#comp_mc_C_rep)>0) \text{ OR } \#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1; \end{aligned}$
mot_mc_A_stb → mot_mc_A_up	T86	$\begin{aligned} &(\#comp_mc_A_stb + \#comp_mc_A_up)=1 \text{ AND} \\ &(((\#mot_mc_B_up + \#comp_mc_B_up)=2 \text{ AND} \\ &(\#mot_mc_C_up + \#comp_mc_C_up)=0) \text{ OR } (\#mot_mc_C_up \\ &+ \#comp_mc_C_up)=2 \text{ AND } (\#mot_mc_B_up + \\ &\#comp_mc_B_up)=0) \text{ OR } (\#mot_mc_B_stb + \\ &\#comp_mc_B_stb)=2 \text{ OR } (\#mot_mc_C_stb + \\ &\#comp_mc_C_stb)=2) \text{ AND } \#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0; \end{aligned}$
comp_mc_A_up → comp_mc_A_stb	T5	#mot_mc_A_up=0;
comp_mc_A_stb → comp_mc_A_up	T861	#mot_mc_A_up=1;
mot_mc_B_up → mot_mc_B_stb	T10	$\begin{aligned} &(\#comp_mc_B_down + \#comp_mc_B_rep)=1 \text{ OR} \\ &(((\#mot_mc_A_down + \#mot_mc_A_rep + \#comp_mc_A_down \\ &+ \#comp_mc_A_rep)>0 \text{ AND } (\#mot_mc_C_down + \\ &\#mot_mc_C_rep + \#comp_mc_C_down + \\ &\#comp_mc_C_rep)>0) \text{ OR } \#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1; \end{aligned}$
mot_mc_B_stb → mot_mc_B_up	T90	$\begin{aligned} &(\#comp_mc_B_stb + \#comp_mc_B_up)=1 \text{ AND} \\ &(((\#mot_mc_A_up + \#comp_mc_A_up)=2 \text{ AND} \\ &(\#mot_mc_C_up + \#comp_mc_C_up)=0) \text{ OR } (\#mot_mc_C_up \\ &+ \#comp_mc_C_up)=2 \text{ AND } (\#mot_mc_A_up + \\ &\#comp_mc_A_up)=0) \text{ OR } (\#mot_mc_A_stb + \\ &\#comp_mc_A_stb)=2 \text{ OR } (\#mot_mc_C_stb + \\ &\#comp_mc_C_stb)=2) \text{ AND } \#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0; \end{aligned}$
comp_mc_B_up → comp_mc_B_stb	T13	#mot_mc_B_up=0;
comp_mc_B_stb → comp_mc_B_up	T901	#mot_mc_B_up=1;

Fonte: Autor.

Tabela B.1 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema
“Compressão principal” (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_mc_C_up → mot_mc_C_stb	T11	(#comp_mc_C_down + #comp_mc_C_rep)=1 OR ((#mot_mc_A_down + #mot_mc_A_rep + #comp_mc_A_down + #comp_mc_A_rep)>0 AND (#mot_mc_B_down + #mot_mc_B_rep + #comp_mc_B_down + #comp_mc_B_rep)>0) OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_mc_C_stb → mot_mc_C_up	T94	(#comp_mc_C_stb + #comp_mc_C_up)=1 AND (((#mot_mc_A_up + #comp_mc_A_up)=2 AND (#mot_mc_B_up + #comp_mc_B_up)=0) OR (#mot_mc_B_up + #comp_mc_B_up)=2 AND (#mot_mc_A_up + #comp_mc_A_up)=0) OR (#mot_mc_A_stb + #comp_mc_A_stb)=2 OR (#mot_mc_B_stb + #comp_mc_B_stb)=2) AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
comp_mc_C_up → comp_mc_C_stb	T12	#mot_mc_C_up=0;
comp_mc_C_stb → comp_mc_C_up	T941	#mot_mc_C_up=1;
mc_down → mc_stb	T59	(#mot_mc_A_stb + #comp_mc_A_stb + #mot_mc_B_stb + #comp_mc_B_stb)=4 OR (#mot_mc_A_stb + #comp_mc_A_stb + #mot_mc_C_stb + #comp_mc_C_stb)=4 OR (#mot_mc_B_stb + #comp_mc_B_stb + #mot_mc_C_stb + #comp_mc_C_stb)=4 ;
mc_up → mc_stb	T45	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mc_stb → mc_up	T57	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
mc_up → mc_down	T46	((#mot_mc_A_down + #mot_mc_A_rep + #comp_mc_A_down + #comp_mc_A_rep)>0 AND (#mot_mc_B_down + #mot_mc_B_rep + #comp_mc_B_down + #comp_mc_B_rep)>0) OR ((#mot_mc_A_down + #mot_mc_A_rep + #comp_mc_A_down + #comp_mc_A_rep)>0 AND (#mot_mc_C_down + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_C_down + #comp_mc_C_rep)>0) OR ((#mot_mc_B_down + #mot_mc_B_rep + #comp_mc_B_down + #comp_mc_B_rep)>0 AND (#mot_mc_C_down + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_C_down + #comp_mc_C_rep)>0);

Fonte: Autor.

Tabela B.2 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Recuperação de vapor”.

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_vru_down → mot_vru_rep	T8421	(#mot_mc_A_rep + #mot_mc_B_rep + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_A_rep + #comp_mc_B_rep + #comp_mc_C_rep + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_rep + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep + #he_deh_rep + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_rep + #sep_dpc_rep + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_rep + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_rep + #he2_co2r_rep + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_rep + #mot_ec_A_rep + #mot_ec_B_rep + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_A_rep + #comp_ec_B_rep + #comp_ec_C_rep + #mot_ic_A_rep + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_A_rep + #comp_ic_B_rep) < rep_teams;
comp_vru_down → comp_vru_rep	T84111	(#comp_vru_down + #comp_vru_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_vru_up → mot_vru_stb	T67	(#comp_vru_up + #comp_vru_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
mot_vru_stb → mot_vru_up	T8621	#mot_vru_up=0;
comp_vru_up → comp_vru_stb	T71	#mot_vru_up=1;
comp_vru_stb → comp_vru_up	T86111	(#mot_vru_stb + #comp_vru_stb)=2;
vru_down → vru_stb	T591	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
vru_up → vru_stb	T451	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
vru_stb → vru_up	T571	(#mot_vru_down + #comp_vru_down + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep)>0;
vru_up → vru_down	T461	

Fonte: Autor.

Tabela B.3 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Desidratação de gás” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
ft_deh_A_down → ft_deh_A_rep	T8411	(#mot_mc_A_rep + #mot_mc_B_rep + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_A_rep + #comp_mc_B_rep + #comp_mc_C_rep + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_rep + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep + #he_deh_rep + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_rep + #sep_dpc_rep + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_rep + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_rep + #he2_co2r_rep + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_rep + #mot_ec_A_rep + #mot_ec_B_rep + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_A_rep + #comp_ec_B_rep + #comp_ec_C_rep + #mot_ic_A_rep + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_A_rep + #comp_ic_B_rep) < rep_teams;
ves_deh_A_down → ves_deh_A_rep	T842	
he_deh_down → he_deh_rep	T3	
ft_deh_B_down → ft_deh_B_rep	T8811	
ves_deh_B_down → ves_deh_B_rep	T882	
ves_deh_C_down → ves_deh_C_rep	T922	

Fonte: Autor.

Tabela B.3 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema
“Desidratação de gás” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
ft_deh_A_up → ft_deh_A_stb	T7	(#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)>1 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ft_deh_B_up → ft_deh_B_stb	T16	#ft_deh_B_up=0 AND (#ves_deh_A_up + #ves_deh_B_up + #ves_deh_C_up + #ves_deh_A_stb + #ves_deh_B_stb + #ves_deh_C_stb)>1 AND (#he_deh_up+#he_deh_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ft_deh_A_stb → ft_deh_A_up	T8611	(#ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)=2 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_down + #ft_deh_B_rep)=2 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ves_deh_A_up → ves_deh_A_stb	T6	((#ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)=1 OR (#ves_deh_B_stb + #ves_deh_C_stb)>0) AND (#ft_deh_A_up+#ft_deh_B_up)>0 AND (#he_deh_up+#he_deh_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ves_deh_A_stb → ves_deh_A_up	T862	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1 OR (#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)>1 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_down + #ft_deh_B_rep)>1;
he_deh_up → he_deh_stb	T21	(#ves_deh_A_up + #ves_deh_B_up + #ves_deh_C_up)=2 AND (#ft_deh_A_up + #ft_deh_B_up)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
he_deh_stb → he_deh_up	T0	#ft_deh_A_up=0 AND (#ves_deh_A_up + #ves_deh_B_up + #ves_deh_C_up + #ves_deh_A_stb + #ves_deh_B_stb + #ves_deh_C_stb)>1 AND (#he_deh_up+#he_deh_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ft_deh_B_stb → ft_deh_B_up	T9011	(#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)=2 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_down + #ft_deh_B_rep)=2 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ves_deh_B_up → ves_deh_B_stb	T15	((#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)=1 OR (#ves_deh_A_stb + #ves_deh_C_stb)>0) AND (#ft_deh_A_up+#ft_deh_B_up)>0 AND (#he_deh_up+#he_deh_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ves_deh_B_stb → ves_deh_B_up	T902	(#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep)=2 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_down + #ft_deh_B_rep)=2 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ves_deh_C_up → ves_deh_C_stb	T14	

Fonte: Autor.

Tabela B.3 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Desidratação de gás” (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
ves_deh_C_stb → ves_deh_C_up	T942	((#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep)=1 OR (#ves_deh_A_stb + #ves_deh_B_stb)>0) AND (#ft_deh_A_up + #ft_deh_B_up)>0 AND (#he_deh_up + #he_deh_stb)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
deh_down → deh_stb	T592	(#ves_deh_A_stb + #ves_deh_B_stb + #ves_deh_C_stb)>1 AND (#ft_deh_A_stb + #ft_deh_B_stb)>0 AND #he_deh_stb=1;
deh_up → deh_stb	T452	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
deh_stb → deh_up	T572	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
deh_up → deh_down	T462	(#ves_deh_A_down + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_down + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_down + #ves_deh_C_rep)>1 OR (#ft_deh_A_down + #ft_deh_B_down + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep)>1 OR (#he_deh_down + #he_deh_rep)=1;

Fonte: Autor.

Tabela B.4 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Ponto de orvalho” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
he_dpc_A_down → he_dpc_A_rep	T19	(#mot_mc_A_rep + #mot_mc_B_rep + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_A_rep + #comp_mc_B_rep + #comp_mc_C_rep + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_rep + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep + #he_deh_rep + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_rep + #sep_dpc_rep + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_rep + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_rep + #he2_co2r_rep + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_rep + #mot_ec_A_rep + #mot_ec_B_rep + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_A_rep + #comp_ec_B_rep + #comp_ec_C_rep + #mot_ic_A_rep + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_A_rep + #comp_ic_B_rep) < rep_teams;
sep_dpc_down → sep_dpc_rep	T310	
ft_dpc_A_down → ft_dpc_A_rep	T191	
he_dpc_B_down → he_dpc_B_rep	T24	
ft_dpc_B_down → ft_dpc_B_rep	T241	
he_dpc_A_up → he_dpc_A_stb	T8	(#he_dpc_B_down + #he_dpc_B_rep)=1 OR (#ft_dpc_A_down + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_down + #ft_dpc_B_rep)=2 OR (#sep_dpc_down + #sep_dpc_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
he_dpc_A_stb → he_dpc_A_up	T17	(#he_dpc_B_up + #he_dpc_B_stb)=1 AND (#sep_dpc_stb + #sep_dpc_up)=1 AND (#ft_dpc_A_stb + #ft_dpc_A_up + #ft_dpc_B_stb + #ft_dpc_B_up)>0 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
sep_dpc_up → sep_dpc_stb	T211	(#he_dpc_A_down + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_down + #he_dpc_B_rep)>0 OR (#ft_dpc_A_down + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_down + #ft_dpc_B_rep)=2 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;

Fonte: Autor.

Tabela B.4 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Ponto de orvalho” (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
sep_dpc_stb → sep_dpc_up	T01	(#he_dpc_A_up + #he_dpc_B_up)=2 AND (#ft_dpc_A_stb + #ft_dpc_A_up + #ft_dpc_B_stb + #ft_dpc_B_up)>0 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ft_dpc_A_up → ft_dpc_A_stb	T810	(#he_dpc_A_down + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_down + #he_dpc_B_rep)>0 OR (#sep_dpc_down + #sep_dpc_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ft_dpc_B_up → ft_dpc_B_stb	T501	
ft_dpc_A_stb → ft_dpc_A_up	T171	#ft_dpc_B_up=0 AND (#he_dpc_A_up + #he_dpc_B_up)=2 AND #sep_dpc_up=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
he_dpc_B_up → he_dpc_B_stb	T50	(#he_dpc_A_down + #he_dpc_A_rep)=1 OR (#ft_dpc_A_down + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_down + #ft_dpc_B_rep)=2 OR (#sep_dpc_down + #sep_dpc_rep)=1 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
he_dpc_B_stb → he_dpc_B_up	T22	(#he_dpc_A_up + #he_dpc_A_stb)=1 AND (#sep_dpc_stb + #sep_dpc_up)=1 AND (#ft_dpc_A_stb + #ft_dpc_A_up + #ft_dpc_B_stb + #ft_dpc_B_up)>0 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ft_dpc_B_stb → ft_dpc_B_up	T221	#ft_dpc_A_up=0 AND (#he_dpc_A_up + #he_dpc_B_up)=2 AND #sep_dpc_up=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
dpc_down → dpc_stb	T593	(#he_dpc_A_stb + #he_dpc_B_stb)=2 AND (#sep_dpc_stb)=1 AND (#ft_dpc_A_stb + #ft_dpc_B_stb)>0;
dpc_up → dpc_stb	T453	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
dpc_stb → dpc_up	T573	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
dpc_up → dpc_down	T463	(#he_dpc_A_down + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_down + #he_dpc_B_rep)>0 OR (#sep_dpc_down + #sep_dpc_rep)=1 OR (#ft_dpc_A_down + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_down + #ft_dpc_B_rep)>1;

Fonte: Autor.

Tabela B.5 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Remoção e compressão de CO₂” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
he1_co2r_A_down → he1_co2r_A_rep	T192	
ms1_co2r_A_down → ms1_co2r_A_rep	T1921	
he2_co2r_down → he2_co2r_rep	T19213	
turb_co2c_A_down → turb_co2c_A_rep	T19221	
comp_co2c_A_down → comp_co2c_A_rep	T192111	
he1_co2r_B_down → he1_co2r_B_rep	T242	
ms1_co2r_B_down → ms1_co2r_B_rep	T2421	
turb_co2c_B_down → turb_co2c_B_rep	T24221	
comp_co2c_B_down → comp_co2c_B_rep	T242111	
ms1_co2r_C_down → ms1_co2r_C_rep	T19212	
ms1_co2r_D_down → ms1_co2r_D_rep	T24212	
he1_co2r_A_up → he1_co2r_A_stb	T81	(#mot_mc_A_rep + #mot_mc_B_rep + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_A_rep + #comp_mc_B_rep + #comp_mc_C_rep + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_rep + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep + #he_deh_rep + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_rep + #sep_dpc_rep + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_rep + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_rep + #he2_co2r_rep + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_rep + #mot_ec_A_rep + #mot_ec_B_rep + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_A_rep + #comp_ec_B_rep + #comp_ec_C_rep + #mot_ic_A_rep + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_A_rep + #comp_ic_B_rep) < rep_teams;
he1_co2r_A_stb → he1_co2r_A_up	T172	(#he1_co2r_B_down + #he1_co2r_B_rep)=1 OR (#ms1_co2r_A_down + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_down + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_down + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_down + #ms1_co2r_D_rep)>0 OR (#he2_co2r_down + #he2_co2r_rep)=1 OR (#turb_co2c_A_down + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_down + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_down + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_down + #comp_co2c_B_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ms1_co2r_A_up → ms1_co2r_A_stb	T811	(#he1_co2r_B_stb + #he1_co2r_B_rep)=1 AND (#ms1_co2r_A_stb + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_stb + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_stb + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_stb + #ms1_co2r_D_rep)=4 AND (#he2_co2r_stb + #he2_co2r_rep)=1 AND (#turb_co2c_A_up + #turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_B_up + #turb_co2c_B_stb + #comp_co2c_A_up + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_up + #comp_co2c_B_rep)=4 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;
ms1_co2r_A_up → ms1_co2r_A_stb	T811	(#he1_co2r_A_down + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_down + #he1_co2r_B_rep)>0 OR (#ms1_co2r_B_down + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_down + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_down + #ms1_co2r_D_rep)>0 OR (#he2_co2r_down + #he2_co2r_rep)=1 OR (#turb_co2c_A_down + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_down + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_down + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_down + #comp_co2c_B_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;

Fonte: Autor.

Tabela B.5 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Remoção e compressão de CO₂” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
ms1_co2r_A_stb → ms1_co2r_A_up	T1721	(#he1_co2r_A_up + #he1_co2r_B_up)=2 AND (#ms1_co2r_B_stb + #ms1_co2r_B_up + #ms1_co2r_C_stb + #ms1_co2r_C_up + #ms1_co2r_D_stb + #ms1_co2r_D_up)=3 AND (#he2_co2r_stb + #he2_co2r_up)=1 AND (#turb_co2c_A_up + #turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_B_up + #turb_co2c_B_stb + #comp_co2c_A_up + #comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_B_up + #comp_co2c_B_stb)=4 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;
he2_co2r_up → he2_co2r_stb	T8113	(#he1_co2r_A_down + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_down + #he1_co2r_B_rep)>0 OR (#ms1_co2r_A_down + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_down + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_down + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_down + #ms1_co2r_D_rep)>0 OR (#turb_co2c_A_down + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_down + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_down + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_down + #comp_co2c_B_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
he2_co2r_stb → he2_co2r_up	T17213	(#he1_co2r_A_up + #he1_co2r_B_up)=2 AND (#ms1_co2r_A_up + #ms1_co2r_B_up + #ms1_co2r_C_up + #ms1_co2r_D_up)=4 AND (#turb_co2c_A_up + #turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_B_up + #turb_co2c_B_stb + #comp_co2c_A_up + #comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_B_up + #comp_co2c_B_stb)=4 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;
turb_co2c_A_up → turb_co2c_A_stb	T81121	(#comp_co2c_A_down + #comp_co2c_A_rep)=1 OR (#turb_co2c_B_down + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_B_down + #comp_co2c_B_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1 OR (#he1_co2r_A_down + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_down + #he1_co2r_B_rep)>0 OR (#ms1_co2r_A_down + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_down + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_down + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_down + #ms1_co2r_D_rep)>0 OR (#he2_co2r_down + #he2_co2r_rep)=1;
turb_co2c_A_stb → turb_co2c_A_up	T17221	(#comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_A_up)=1 AND (#turb_co2c_B_stb + #turb_co2c_B_up + #comp_co2c_B_stb + #comp_co2c_B_up)=2 AND (#he1_co2r_A_up + #he1_co2r_B_up)=2 AND (#ms1_co2r_A_up + #ms1_co2r_B_up + #ms1_co2r_C_up + #ms1_co2r_D_up)=4 AND (#he2_co2r_up)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;
comp_co2c_A_up → comp_co2c_A_stb	T811111	#turb_co2c_A_up =0;
comp_co2c_A_stb → comp_co2c_A_up	T172111	#turb_co2c_A_up =1;

Fonte: Autor.

Tabela B.5 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema
 “Remoção e compressão de CO₂” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
he1_co2r_B_up → he1_co2r_B_stb	T502	$(\#he1_co2r_A_down + \#he1_co2r_A_rep)=1 \text{ OR}$ $(\#ms1_co2r_A_down + \#ms1_co2r_A_rep +$ $\#ms1_co2r_B_down + \#ms1_co2r_B_rep +$ $\#ms1_co2r_C_down + \#ms1_co2r_C_rep +$ $\#ms1_co2r_D_down + \#ms1_co2r_D_rep) > 0 \text{ OR}$ $(\#he2_co2r_down + \#he2_co2r_rep)=1 \text{ OR } (\#he2_co2r_down +$ $\#he2_co2r_rep)=1 \text{ OR } (\#turb_co2c_A_down +$ $\#turb_co2c_A_rep + \#turb_co2c_B_down + \#turb_co2c_B_rep$ $+ \#comp_co2c_A_down + \#comp_co2c_A_rep +$ $\#comp_co2c_B_down + \#comp_co2c_B_rep) > 0 \text{ OR}$ $\#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;$
he1_co2r_B_stb → he1_co2r_B_up	T222	$(\#he1_co2r_A_stb + \#he1_co2r_A_up)=1 \text{ AND}$ $(\#ms1_co2r_A_stb + \#ms1_co2r_A_up + \#ms1_co2r_B_stb +$ $\#ms1_co2r_B_up + \#ms1_co2r_C_stb + \#ms1_co2r_C_up +$ $\#ms1_co2r_D_stb + \#ms1_co2r_D_up)=4 \text{ AND}$ $(\#he2_co2r_stb + \#he2_co2r_up)=1 \text{ AND } (\#turb_co2c_A_up +$ $\#turb_co2c_A_stb + \#turb_co2c_B_up + \#turb_co2c_B_stb +$ $\#comp_co2c_A_up + \#comp_co2c_A_stb + \#comp_co2c_B_up$ $+ \#comp_co2c_B_stb)=4 \text{ AND } \#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0$ $\text{AND } \#co2_down=0;$
ms1_co2r_B_up → ms1_co2r_B_stb	T5021	$(\#he1_co2r_A_down + \#he1_co2r_A_rep + \#he1_co2r_B_down$ $+ \#he1_co2r_B_rep) > 0 \text{ OR } (\#ms1_co2r_A_down +$ $\#ms1_co2r_A_rep + \#ms1_co2r_C_down + \#ms1_co2r_C_rep$ $+ \#ms1_co2r_D_down + \#ms1_co2r_D_rep) > 0 \text{ OR}$ $(\#he2_co2r_down + \#he2_co2r_rep)=1 \text{ OR}$ $(\#turb_co2c_A_down + \#turb_co2c_A_rep +$ $\#turb_co2c_B_down + \#turb_co2c_B_rep +$ $\#comp_co2c_A_down + \#comp_co2c_A_rep +$ $\#comp_co2c_B_down + \#comp_co2c_B_rep) > 0 \text{ OR}$ $\#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;$
ms1_co2r_B_stb → ms1_co2r_B_up	T2221	$(\#he1_co2r_A_up + \#he1_co2r_B_up)=2 \text{ AND}$ $(\#ms1_co2r_A_stb + \#ms1_co2r_A_up + \#ms1_co2r_C_stb +$ $\#ms1_co2r_C_up + \#ms1_co2r_D_stb + \#ms1_co2r_D_up)=3$ $\text{AND } (\#he2_co2r_stb + \#he2_co2r_up)=1 \text{ AND}$ $(\#turb_co2c_A_up + \#turb_co2c_A_stb + \#turb_co2c_B_up +$ $\#turb_co2c_B_stb + \#comp_co2c_A_up + \#comp_co2c_A_stb$ $+ \#comp_co2c_B_up + \#comp_co2c_B_stb)=4 \text{ AND}$ $\#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 \text{ AND } \#co2_down=0;$
turb_co2c_B_up → turb_co2c_B_stb	T50221	$(\#comp_co2c_B_down + \#comp_co2c_B_rep)=1 \text{ OR}$ $(\#turb_co2c_A_down + \#turb_co2c_A_rep +$ $\#comp_co2c_A_down + \#comp_co2c_A_rep) > 0 \text{ OR}$ $\#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1 \text{ OR } (\#he1_co2r_A_down +$ $\#he1_co2r_A_rep + \#he1_co2r_B_down +$ $\#he1_co2r_B_rep) > 0 \text{ OR } (\#ms1_co2r_A_down +$ $\#ms1_co2r_A_rep + \#ms1_co2r_B_down + \#ms1_co2r_B_rep$ $+ \#ms1_co2r_C_down + \#ms1_co2r_C_rep +$ $\#ms1_co2r_D_down + \#ms1_co2r_D_rep) > 0 \text{ OR}$ $(\#he2_co2r_down + \#he2_co2r_rep)=1;$

Fonte: Autor.

Tabela B.5 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema
 “Remoção e compressão de CO₂” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
turb_co2c_B_stb → turb_co2c_B_up	T22221	(#comp_co2c_B_stb + #comp_co2c_B_up)=1 AND (#turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_A_up + #comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_A_up)=2 AND (#he1_co2r_A_up + #he1_co2r_B_up)=2 AND (#ms1_co2r_A_up + #ms1_co2r_B_up + #ms1_co2r_C_up + #ms1_co2r_D_up)=4 AND (#he2_co2r_up)=1 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;
comp_co2c_B_up → comp_co2c_B_stb	T502111	#turb_co2c_B_up =0;
comp_co2c_B_stb → comp_co2c_B_up	T222111	#turb_co2c_B_up =1;
ms1_co2r_C_up → ms1_co2r_C_stb	T8111	(#he1_co2r_A_down+ #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_down + #he1_co2r_B_rep)>0 OR (#ms1_co2r_A_down + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_down + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_D_down + #ms1_co2r_D_rep)>0 OR (#he2_co2r_down + #he2_co2r_rep)=1 OR (#turb_co2c_A_down + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_down + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_down + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_down + #comp_co2c_B_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ms1_co2r_C_stb → ms1_co2r_C_up	T17212	(#he1_co2r_A_up + #he1_co2r_B_up)=2 AND (#ms1_co2r_A_stb + #ms1_co2r_A_up + #ms1_co2r_B_stb + #ms1_co2r_B_up + #ms1_co2r_D_stb + #ms1_co2r_D_up)=3 AND (#he2_co2r_stb + #he2_co2r_up)=1 AND (#turb_co2c_A_up + #turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_B_up + #turb_co2c_B_stb + #comp_co2c_A_up + #comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_B_up + #comp_co2c_B_stb)=4 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;
ms1_co2r_D_up → ms1_co2r_D_stb	T50212	(#he1_co2r_A_down+ #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_down + #he1_co2r_B_rep)>0 OR (#ms1_co2r_A_down + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_down + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_down + #ms1_co2r_C_rep)>0 OR (#he2_co2r_down + #he2_co2r_rep)=1 OR (#turb_co2c_A_down + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_down + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_down + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_down + #comp_co2c_B_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ms1_co2r_D_stb → ms1_co2r_D_up	T22212	(#he1_co2r_A_up + #he1_co2r_B_up)=2 AND (#ms1_co2r_A_stb + #ms1_co2r_A_up + #ms1_co2r_B_stb + #ms1_co2r_B_up + #ms1_co2r_C_stb + #ms1_co2r_C_up)=3 AND (#he2_co2r_stb + #he2_co2r_up)=1 AND (#turb_co2c_A_up + #turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_B_up + #turb_co2c_B_stb + #comp_co2c_A_up + #comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_B_up + #comp_co2c_B_stb)=4 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;

Fonte: Autor.

Tabela B.5 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Remoção e compressão de CO₂” (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
ms1_co2r_D_stb → ms1_co2r_D_up	T22212	(#he1_co2r_A_up + #he1_co2r_B_up)=2 AND (#ms1_co2r_A_stb + #ms1_co2r_A_up + #ms1_co2r_B_stb + #ms1_co2r_B_up + #ms1_co2r_C_stb + #ms1_co2r_C_up)=3 AND (#he2_co2r_stb + #he2_co2r_up)=1 AND (#turb_co2c_A_up + #turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_B_up + #turb_co2c_B_stb + #comp_co2c_A_up + #comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_B_up + #comp_co2c_B_stb)=4 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #co2_down=0;
co2_down → co2_stb	T594112	(#he1_co2r_A_stb + #he1_co2r_B_stb)=2 AND (#ms1_co2r_A_stb + #ms1_co2r_B_stb + #ms1_co2r_C_stb + #ms1_co2r_D_stb)=4 AND (#he2_co2r_stb)=1 AND (#turb_co2c_A_stb + #turb_co2c_B_stb + #comp_co2c_A_stb + #comp_co2c_B_stb)=4;
co2_up → co2_stb	T454112	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
co2_stb → co2_up	T574112	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
co2_up → co2_down	T464112	(#he1_co2r_A_down + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_down + #he1_co2r_B_rep)>0 OR (#ms1_co2r_A_down + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_down + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_down + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_down + #ms1_co2r_D_rep)>0 OR (#he2_co2r_down + #he2_co2r_rep)=1 OR (#turb_co2c_A_down + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_down + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_down + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_down + #comp_co2c_B_rep)>0;

Fonte: Autor.

Tabela B.6 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema “Compressão de exportação” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_ec_A_down → mot_ec_A_rep	T843	(#mot_mc_A_rep + #mot_mc_B_rep + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_A_rep + #comp_mc_B_rep +
comp_ec_A_down → comp_ec_A_rep	T8412	#comp_mc_C_rep + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_rep +
mot_ec_B_down → mot_ec_B_rep	T883	#ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep + #he_deh_rep + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_rep + #sep_dpc_rep +
comp_ec_B_down → comp_ec_B_rep	T8812	#ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_rep + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_rep
mot_ec_C_down → mot_ec_C_rep	T923	+ #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_rep + #he2_co2r_rep + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_rep +
comp_ec_C_down → comp_ec_C_rep	T9211	#mot_ec_A_rep + #mot_ec_B_rep + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_A_rep + #comp_ec_B_rep + #comp_ec_C_rep + #mot_ic_A_rep + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_A_rep + #comp_ic_B_rep) < rep_teams;

Fonte: Autor.

Tabela B.6 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema
 “Compressão de exportação” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_ec_A_up → mot_ec_A_stb	T42	(#comp_ec_A_down + #comp_ec_A_rep)=1 OR ((#mot_ec_B_down + #mot_ec_B_rep + #comp_ec_B_down + #comp_ec_B_rep)>0 AND (#mot_ec_C_down + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_C_down + #comp_ec_C_rep)>0) OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_ec_A_stb → mot_ec_A_up	T863	(#comp_ec_A_stb + #comp_ec_A_up)=1 AND (((#mot_ec_B_up + #comp_ec_B_up)=2 AND (#mot_ec_C_up + #comp_ec_C_up)=0) OR (#mot_ec_C_up + #comp_ec_C_up)=2 AND (#mot_ec_B_up + #comp_ec_B_up)=0) OR (#mot_ec_B_stb + #comp_ec_B_stb)=2 OR (#mot_ec_C_stb + #comp_ec_C_stb)=2) AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
comp_ec_A_up → comp_ec_A_stb	T510	#mot_ec_A_up=0;
comp_ec_A_stb → comp_ec_A_up	T8612	#mot_ec_A_up=1;
mot_ec_B_up → mot_ec_B_stb	T107	(#comp_ec_B_down + #comp_ec_B_rep)=1 OR ((#mot_ec_A_down + #mot_ec_A_rep + #comp_ec_A_down + #comp_ec_A_rep)>0 AND (#mot_ec_C_down + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_C_down + #comp_ec_C_rep)>0) OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_ec_B_stb → mot_ec_B_up	T903	(#comp_ec_B_stb + #comp_ec_B_up)=1 AND (((#mot_ec_A_up + #comp_ec_A_up)=2 AND (#mot_ec_C_up + #comp_ec_C_up)=0) OR (#mot_ec_C_up + #comp_ec_C_up)=2 AND (#mot_ec_A_up + #comp_ec_A_up)=0) OR (#mot_ec_A_stb + #comp_ec_A_stb)=2 OR (#mot_ec_C_stb + #comp_ec_C_stb)=2) AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
comp_ec_B_up → comp_ec_B_stb	T131	#mot_ec_B_up=0;
comp_ec_B_stb → comp_ec_B_up	T9012	#mot_ec_B_up=1;
mot_ec_C_up → mot_ec_C_stb	T111	(#comp_ec_C_down + #comp_ec_C_rep)=1 OR ((#mot_ec_A_down + #mot_ec_A_rep + #comp_ec_A_down + #comp_ec_A_rep)>0 AND (#mot_ec_B_down + #mot_ec_B_rep + #comp_ec_B_down + #comp_ec_B_rep)>0) OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_ec_C_stb → mot_ec_C_up	T943	(#comp_ec_C_stb + #comp_ec_C_up)=1 AND (((#mot_ec_A_up + #comp_ec_A_up)=2 AND (#mot_ec_B_up + #comp_ec_B_up)=0) OR (#mot_ec_B_up + #comp_ec_B_up)=2 AND (#mot_ec_A_up + #comp_ec_A_up)=0) OR (#mot_ec_A_stb + #comp_ec_A_stb)=2 OR (#mot_ec_B_stb + #comp_ec_B_stb)=2) AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
comp_ec_C_up → comp_ec_C_stb	T121	#mot_ec_C_up=0;
comp_ec_C_stb → comp_ec_C_up	T9411	#mot_ec_C_up=1;
ec_down → ec_stb	T594	(#mot_ec_A_stb + #comp_ec_A_stb + #mot_ec_B_stb + #comp_ec_B_stb)=4 OR (#mot_ec_A_stb + #comp_ec_A_stb + #mot_ec_C_stb + #comp_ec_C_stb)=4 OR (#mot_ec_B_stb + #comp_ec_B_stb + #mot_ec_C_stb + #comp_ec_C_stb)=4 ;

Fonte: Autor.

Tabela B.6 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema
“Compressão de exportação” (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
ec_up → ec_stb	T454	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ec_stb → ec_up	T574	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ec_up → ec_down	T464	((#mot_ec_A_down + #mot_ec_A_rep + #comp_ec_A_down + #comp_ec_A_rep)>0 AND (#mot_ec_B_down + #mot_ec_B_rep + #comp_ec_B_down + #comp_ec_B_rep)>0) OR ((#mot_ec_A_down + #mot_ec_A_rep + #comp_ec_A_down + #comp_ec_A_rep)>0 AND (#mot_ec_C_down + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_C_down + #comp_ec_C_rep)>0) OR ((#mot_ec_B_down + #mot_ec_B_rep + #comp_ec_B_down + #comp_ec_B_rep)>0 AND (#mot_ec_C_down + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_C_down + #comp_ec_C_rep)>0);

Fonte: Autor.

Tabela B.7 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema
“Compressão de injeção” (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_ic_A_down → mot_ic_A_rep	T1922	(#mot_mc_A_rep + #mot_mc_B_rep + #mot_mc_C_rep + #comp_mc_A_rep + #comp_mc_B_rep + #comp_mc_C_rep + #mot_vru_rep + #comp_vru_rep + #ves_deh_A_rep + #ves_deh_B_rep + #ves_deh_C_rep + #ft_deh_A_rep + #ft_deh_B_rep + #he_deh_rep + #he_dpc_A_rep + #he_dpc_B_rep + #sep_dpc_rep + #ft_dpc_A_rep + #ft_dpc_B_rep + #he1_co2r_A_rep + #he1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_A_rep + #ms1_co2r_B_rep + #ms1_co2r_C_rep + #ms1_co2r_D_rep + #he2_co2r_rep + #turb_co2c_A_rep + #turb_co2c_B_rep + #comp_co2c_A_rep + #comp_co2c_B_rep + #mot_ec_A_rep + #mot_ec_B_rep + #mot_ec_C_rep + #comp_ec_A_rep + #comp_ec_B_rep + #comp_ec_C_rep + #mot_ic_A_rep + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_A_rep + #comp_ic_B_rep) < rep_teams;
comp_ic_A_down → comp_ic_A_rep	T9211	
mot_ic_B_down → mot_ic_B_rep	T2422	
comp_ic_B_down → comp_ic_B_rep	T24211	
mot_ic_A_up → mot_ic_A_stb	T8112	(#comp_ic_A_down + #comp_ic_A_rep)=1 OR (#mot_ic_B_down + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_B_down + #comp_ic_B_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_ic_A_stb → mot_ic_A_up	T1722	(#comp_ic_A_stb + #comp_ic_A_rep)=1 AND (#mot_ic_B_stb + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_B_stb + #comp_ic_B_rep)=2 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #ic_down=0;
comp_ic_A_up → comp_ic_A_stb	T81111	#mot_ic_A_up =0;
comp_ic_A_stb → comp_ic_A_up	T17211	#mot_ic_A_up =1;
mot_ic_B_up → mot_ic_B_stb	T5022	(#comp_ic_B_down + #comp_ic_B_rep)=1 OR (#mot_ic_A_down + #mot_ic_A_rep + #comp_ic_A_down + #comp_ic_A_rep)>0 OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_ic_B_stb → mot_ic_B_up	T2222	(#comp_ic_B_stb + #comp_ic_B_rep)=1 AND (#mot_ic_A_stb + #mot_ic_A_rep + #comp_ic_A_stb + #comp_ic_A_rep)=2 AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0 AND #ic_down=0;
comp_ic_B_up → comp_ic_B_stb	T50211	#mot_ic_B_up =0;

Fonte: Autor.

Tabela B.7 - Modelo B: funções de habilitação para as transições imediatas do subsistema "Compressão de injeção" (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
comp_ic_B_stb → comp_ic_B_up	T22211	#mot_ic_B_up =1;
ic_down → ic_stb	T59411	(#mot_ic_A_stb + #comp_ic_A_stb + #mot_ic_B_stb + #comp_ic_B_stb)=4;
ic_up → ic_stb	T45411	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
ic_stb → ic_up	T57411	#mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
ic_up → ic_down	T46411	(#mot_ic_A_down + #mot_ic_A_rep + #comp_ic_A_down + #comp_ic_A_rep + #mot_ic_B_down + #mot_ic_B_rep + #comp_ic_B_down + #comp_ic_B_rep)>0;

Fonte: Autor.

APÊNDICE C – MODELO C: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS

Tabela C.1 – Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe dos subsistemas da plataforma 1.

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P1_co2_down → P1_co2_rep	T9	
P1_ic_down → P1_ic_rep	T11	(#P1_co2_rep+#P1_ic_rep+#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)<rep_teams;
P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down → P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep	T12	
P1_co2_up → P1_co2_stb	T6	(#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1;
P1_ic_up → P1_ic_stb	T7	
P1_co2_stb → P1_co2_up	T10	(#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P1_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0;
P1_ic_stb → P1_ic_up	T8	

Fonte: Autor.

Tabela C.2 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe dos subsistemas da plataforma 2.

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P2_co2_down → P2_co2_rep	T91	
P2_ic_down → P2_ic_rep	T111	(#P2_co2_rep+#P2_ic_rep+#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)<rep_teams;
P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down → P2_mc_vru_deh_dpc_ec_rep	T121	
P2_co2_up → P2_co2_stb	T61	(#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1;
P2_ic_up → P2_ic_stb	T71	
P2_co2_stb → P2_co2_up	T101	(#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0;
P2_ic_stb → P2_ic_up	T81	

Fonte: Autor.

Tabela C.3 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe para os modos de operação da plataforma 2 (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P2_inj_exp → P2_exp_only	T131	(#P2_ic_down+#P2_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P3_exp_only+#P4_exp_only)=0;
P2_inj_exp → P2_inj_only	T141	(#P2_co2_down+#P2_co2_rep)=1 AND (#P1_inj_only+#P3_inj_only+#P4_inj_only)=0;
P2_exp_only → P2_inj_exp	T151	(#P2_ic_down+#P2_ic_rep)=0;
P2_inj_only → P2_inj_exp	T161	(#P2_co2_down+#P2_co2_rep)=0;
P2_shutdown → P2_inj_exp	T211	(#P2_ic_down+#P2_ic_rep)=0 AND (#P2_co2_down+#P2_co2_rep)=0 AND (#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0;
P2_inj_exp → P2_shutdown	T221	(#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1OR ((#P2_ic_down+#P2_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P3_exp_only+#P4_exp_only)>0) OR ((#P2_co2_down+#P2_co2_rep)=1 AND (#P1_inj_only+#P3_inj_only+#P4_inj_only)>0);

Fonte: Autor.

Tabela C.3 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe para os modos de operação da plataforma 2 (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P2_shutdown → P2_exp_only	T181	(#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P2_mc_vru_deh_dp c_ec_rep)=0 AND (#P2_ic_down+#P2_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P3_exp_only+#P4_exp_only)=0;
P2_shutdown → P2_inj_only	T191	(#P2_ic_down+#P2_ic_rep)=0 AND (#P2_co2_down+#P2_co2_rep)=1 AND (#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P2_mc_vru_deh_dp c_ec_rep)=0 AND (#P1_inj_only+#P3_inj_only+#P4_inj_only)=0;
P2_exp_only → P2_shutdown	T171	(#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P2_mc_vru_deh_dp c_ec_rep)=1;
P2_inj_only → P2_shutdown	T201	(#P2_mc_vru_deh_dpc_ec_rep+#P2_mc_vru_deh_dpc_ ec_down)=1 OR (#P2_ic_down+#P2_ic_rep)=1;

Fonte: Autor.

Tabela C.4 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe dos subsistemas da plataforma 3.

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P3_co2_down → P3_co2_rep	T92	
P3_ic_down → P3_ic_rep	T27	(#P3_co2_rep+#P3_ic_rep+#P3_mc_v ru_deh_dpc_ec_rep)<rep_teams;
P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down → P3_mc_vru_deh_dpc_ec_rep	T122	
P3_co2_up → P3_co2_stb	T62	(#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P3 _mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1;
P3_ic_up → P3_ic_stb	T72	
P3_co2_stb → P3_co2_up	T102	(#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P3 _mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0;
P3_ic_stb → P3_ic_up	T82	

Fonte: Autor.

Tabela C.5 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe para os modos de operação da plataforma 3 (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P3_inj_exp → P3_exp_only	T132	(#P3_ic_down+#P3_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P2_exp_only+#P4_exp_only)=0;
P3_inj_exp → P3_inj_only	T142	(#P3_co2_down+#P3_co2_rep)=1 AND (#P1_inj_only+#P2_inj_only+#P4_inj_only)=0;
P3_exp_only → P3_inj_exp	T152	(#P3_ic_down+#P3_ic_rep)=0;
P3_inj_only → P3_inj_exp	T162	(#P3_co2_down+#P3_co2_rep)=0;
P3_shutdown → P3_inj_exp	T212	(#P3_ic_down+#P3_ic_rep)=0 AND (#P3_co2_down+#P3_co2_rep)=0 AND (#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_re p)=0;
P3_inj_exp → P3_shutdown	T222	(#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_re p)=1 OR ((#P3_ic_down+#P3_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P2_exp_only+#P4_exp_only)>0) OR ((#P3_co2_down+#P3_co2_rep)=1 AND (#P1_inj_only+#P2_inj_only+#P4_inj_only)>0);

Fonte: Autor.

Tabela C.5 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe para os modos de operação da plataforma 3 (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P3_shutdown → P3_exp_only	T182	(#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0 AND (#P3_ic_down+#P3_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P2_exp_only+#P4_exp_only)=0;
P3_shutdown → P3_inj_only	T192	(#P3_ic_down+#P3_ic_rep)=0 AND (#P3_co2_down+#P3_co2_rep)=1 AND (#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0 AND (#P1_inj_only+#P2_inj_only+#P4_inj_only)=0;
P3_exp_only → P3_shutdown	T172	(#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1;
P3_inj_only → P3_shutdown	T202	(#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_rep+#P3_mc_vru_deh_dpc_ec_down)=1 OR (#P3_ic_down+#P3_ic_rep)=1;

Fonte: Autor.

Tabela C.6 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe dos subsistemas da plataforma 4.

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P4_co2_down → P4_co2_rep	T93	(#P4_co2_rep+#P4_ic_rep+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)<rep_teams;
P4_ic_down → P4_ic_rep	T29	
P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down → P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep	T123	(#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1;
P4_co2_up → P4_co2_stb	T63	
P4_ic_up → P4_ic_stb	T73	(#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0;
P4_co2_stb → P4_co2_up	T103	
P4_ic_stb → P4_ic_up	T83	

Fonte: Autor.

Tabela C.7 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe para os modos de operação da plataforma 4 (continua).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P4_inj_exp → P4_exp_only	T133	(#P4_ic_down+#P4_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P2_exp_only+#P3_exp_only)=0;
P4_inj_exp → P4_inj_only	T143	(#P4_co2_down+#P4_co2_rep)=1 AND (#P1_inj_only+#P2_inj_only+#P3_inj_only)=0;
P4_exp_only → P4_inj_exp	T153	(#P4_ic_down+#P4_ic_rep)=0;
P4_inj_only → P4_inj_exp	T163	(#P4_co2_down+#P4_co2_rep)=0;
P4_shutdown → P4_inj_exp	T213	(#P4_ic_down+#P4_ic_rep)=0 AND (#P4_co2_down+#P4_co2_rep)=0 AND (#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0;
P4_inj_exp → P4_shutdown	T223	(#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1 OR ((#P4_ic_down+#P4_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P2_exp_only+#P3_exp_only)>0) OR ((#P4_co2_down+#P4_co2_rep)=1 AND (#P1_inj_only+#P2_inj_only+#P3_inj_only)>0);

Fonte: Autor.

Tabela C.7 - Modelo C: funções de habilitação para as transições imediatas das RdPe para os modos de operação da plataforma 4 (conclusão).

Lugar de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
P4_shutdown → P4_exp_only	T183	(#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0 AND (#P4_ic_down+#P4_ic_rep)=1 AND (#P1_exp_only+#P2_exp_only+#P3_exp_only)=0;
P4_shutdown → P4_inj_only	T193	(#P4_ic_down+#P4_ic_rep)=0 AND (#P4_co2_down+#P4_co2_rep)=1 AND (#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=0 AND (#P1_inj_only+#P2_inj_only+#P3_inj_only)=0;
P4_exp_only → P4_shutdown	T173	(#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep)=1;
P4_inj_only → P4_shutdown	T203	(#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_rep+#P4_mc_vru_deh_dpc_ec_down)=1 OR (#P4_ic_down+#P4_ic_rep)=1;

Fonte: Autor.

APÊNDICE D – MODELO D: FUNÇÕES DE HABILITAÇÃO PARA AS TRANSIÇÕES IMEDIATAS

Tabela D.1 – Modelo D: funções de habilitação para as transições imediatas (continua).

Luga de entrada lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_mc_A_stb → mot_mc_A_up	T86	(#comp_mc_A_stb + #comp_mc_A_up)=1 AND (((#mot_mc_B_up + #comp_mc_B_up)=2 AND ((#mot_mc_C_up + #comp_mc_C_up)=0 OR (#mot_mc_C_deg + #comp_mc_C_deg)>0)) OR ((#mot_mc_C_up + #comp_mc_C_up)=2 AND ((#mot_mc_B_up + #comp_mc_B_up)=0 OR (#mot_mc_B_deg + #comp_mc_B_deg)>0)) OR ((#mot_mc_B_stb + #comp_mc_B_stb)=2 OR (#mot_mc_C_stb + #comp_mc_C_stb)=2)) AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
mot_mc_B_stb → mot_mc_B_up	T90	(#comp_mc_B_stb + #comp_mc_B_up)=1 AND (((#mot_mc_A_up + #comp_mc_A_up)=2 AND ((#mot_mc_C_up + #comp_mc_C_up)=0 OR (#mot_mc_C_deg + #comp_mc_C_deg)>0)) OR ((#mot_mc_C_up + #comp_mc_C_up)=2 AND ((#mot_mc_A_up + #comp_mc_A_up)=0 OR (#mot_mc_A_deg + #comp_mc_A_deg)>0)) OR ((#mot_mc_A_stb + #comp_mc_A_stb)=2 OR (#mot_mc_C_stb + #comp_mc_C_stb)=2)) AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
mot_mc_C_stb → mot_mc_C_up	T94	(#comp_mc_C_stb + #comp_mc_C_up)=1 AND (((#mot_mc_B_up + #comp_mc_B_up)=2 AND ((#mot_mc_A_up + #comp_mc_A_up)=0 OR (#mot_mc_A_deg + #comp_mc_A_deg)>0)) OR ((#mot_mc_A_up + #comp_mc_A_up)=2 AND ((#mot_mc_B_up + #comp_mc_B_up)=0 OR (#mot_mc_B_deg + #comp_mc_B_deg)>0)) OR ((#mot_mc_B_stb + #comp_mc_B_stb)=2 OR (#mot_mc_A_stb + #comp_mc_A_stb)=2)) AND #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=0;
comp_mc_A_stb → comp_mc_A_up	T861	#mot_mc_A_up=1;
comp_mc_B_stb → comp_mc_B_up	T901	#mot_mc_B_up=1;
comp_mc_C_stb → comp_mc_C_up	T941	#mot_mc_C_up=1;
mot_mc_A_up → mot_mc_A_stb	T4	(#comp_mc_A_down + #comp_mc_A_rep_crt + #comp_mc_A_rep_deg)=1 OR ((#mot_mc_B_down + #mot_mc_B_rep_crt + #mot_mc_B_rep_deg + #comp_mc_B_rep_deg)>0 AND (#mot_mc_C_down + #mot_mc_C_rep_crt + #mot_mc_C_rep_deg + #comp_mc_C_down + #comp_mc_C_rep_crt + #comp_mc_C_rep_deg)>0) OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
mot_mc_B_up → mot_mc_B_stb	T10	(#comp_mc_B_down + #comp_mc_B_rep_crt + #comp_mc_B_rep_deg)=1 OR ((#mot_mc_A_down + #mot_mc_A_rep_crt + #mot_mc_A_rep_deg + #comp_mc_A_down + #comp_mc_A_rep_crt + #comp_mc_A_rep_deg)>0 AND (#mot_mc_C_down + #mot_mc_C_rep_crt + #mot_mc_C_rep_deg + #comp_mc_C_down + #comp_mc_C_rep_crt + #comp_mc_C_rep_deg)>0) OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;

Fonte: Autor.

Tabela D.1 – Modelo D: funções de habilitação para as transições imediatas (continua).

Luga de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mot_mc_C_up → mot_mc_C_stb	T11	(#comp_mc_C_down + #comp_mc_C_rep_crt + #comp_mc_C_rep_deg)=1 OR ((#mot_mc_B_down + #mot_mc_B_rep_crt + #mot_mc_B_rep_deg + #comp_mc_B_down + #comp_mc_B_rep_crt + #comp_mc_B_rep_deg)>0 AND (#mot_mc_A_down + #mot_mc_A_rep_crt + #mot_mc_A_rep_deg + #comp_mc_A_down + #comp_mc_A_rep_crt + #comp_mc_A_rep_deg)>0) OR #mc_vru_deh_dpc_ec_NOK=1;
comp_mc_A_up → comp_mc_A_stb	T5	(#mot_mc_A_up+#mot_mc_A_deg)=0;
comp_mc_C_up → comp_mc_C_stb	T12	(#mot_mc_C_up+#mot_mc_C_deg)=0;
comp_mc_B_up → comp_mc_B_stb	T13	(#mot_mc_B_up+#mot_mc_B_deg)=0;
mot_mc_A_down → mot_mc_A_rep	T0	
comp_mc_A_down → comp_mc_A_rep	T01	(#mot_mc_A_rep_crt + #mot_mc_B_rep_crt + #mot_mc_C_rep_crt + #comp_mc_A_rep_crt + #comp_mc_B_rep_crt + #comp_mc_C_rep_crt + #mot_mc_A_rep_deg + #mot_mc_B_rep_deg + #mot_mc_C_rep_deg + #comp_mc_A_rep_deg + #comp_mc_B_rep_deg + #comp_mc_C_rep_deg) < rep_teams
mot_mc_C_down → mot_mc_C_rep	T02	
comp_mc_C_down → comp_mc_C_rep	T03	
comp_mc_B_down → comp_mc_B_rep	T04	
mot_mc_B_down → mot_mc_B_rep	T05	
mot_mc_A_deg → mot_mc_A_rep2	T3	(#mot_mc_B_up+#mot_mc_C_up)=2 OR (#mc_down)=1 AND (#mot_mc_A_rep_crt + #mot_mc_B_rep_crt + #mot_mc_C_rep_crt + #comp_mc_A_rep_crt + #comp_mc_B_rep_crt + #comp_mc_C_rep_crt + #mot_mc_A_rep_deg + #mot_mc_B_rep_deg + #mot_mc_C_rep_deg + #comp_mc_A_rep_deg + #comp_mc_B_rep_deg + #comp_mc_C_rep_deg) < rep_teams;
comp_mc_A_deg → comp_mc_A_rep2	T31	
mot_mc_B_deg → mot_mc_B_rep2	T32	(#mot_mc_A_up+#mot_mc_C_up)=2 OR (#mc_down)=1 AND (#mot_mc_A_rep_crt + #mot_mc_B_rep_crt + #mot_mc_C_rep_crt + #comp_mc_A_rep_crt + #comp_mc_B_rep_crt + #comp_mc_C_rep_crt + #mot_mc_A_rep_deg + #mot_mc_B_rep_deg + #mot_mc_C_rep_deg + #comp_mc_A_rep_deg + #comp_mc_B_rep_deg + #comp_mc_C_rep_deg) < rep_teams;
comp_mc_B_deg → comp_mc_B_rep2	T311	
mot_mc_C_deg → mot_mc_C_rep2	T321	(#mot_mc_A_up+#mot_mc_B_up)=2 OR (#mc_down)=1 AND (#mot_mc_A_rep_crt + #mot_mc_B_rep_crt + #mot_mc_C_rep_crt + #comp_mc_A_rep_crt + #comp_mc_B_rep_crt + #comp_mc_C_rep_crt + #mot_mc_A_rep_deg + #mot_mc_B_rep_deg + #mot_mc_C_rep_deg + #comp_mc_A_rep_deg + #comp_mc_B_rep_deg + #comp_mc_C_rep_deg) < rep_teams;
comp_mc_B_deg → comp_mc_B_rep2	T311	

Fonte: Autor.

Tabela D.1 – Modelo D: funções de habilitação para as transições imediatas (conclusão).

Luga de entrada → lugar de saída	Transição	Função de habilitação
mc_up → mc_down	T46	$ \begin{aligned} & ((\#mot_mc_A_down + \#mot_mc_A_rep_crt + \\ & \#mot_mc_A_rep_deg + \#comp_mc_A_down + \\ & \#comp_mc_A_rep_crt + \#comp_mc_A_rep_deg) > 0 \text{ AND} \\ & (\#mot_mc_B_down + \#mot_mc_B_rep_crt + \\ & \#mot_mc_B_rep_deg + \#comp_mc_B_down + \\ & \#comp_mc_B_rep_crt + \#comp_mc_B_rep_deg) > 0) \text{ OR} \\ & ((\#mot_mc_A_down + \#mot_mc_A_rep_crt + \\ & \#mot_mc_A_rep_deg + \#comp_mc_A_down + \\ & \#comp_mc_A_rep_crt + \#comp_mc_A_rep_deg) > 0 \text{ AND} \\ & (\#mot_mc_C_down + \#mot_mc_C_rep_crt + \\ & \#mot_mc_C_rep_deg + \#comp_mc_C_down + \\ & \#comp_mc_C_rep_crt + \#comp_mc_C_rep_deg) > 0) \text{ OR} \\ & ((\#mot_mc_B_down + \#mot_mc_B_rep_crt \\ & + \#mot_mc_B_rep_deg + \#comp_mc_B_down + \\ & \#comp_mc_B_rep_crt + \#comp_mc_B_rep_deg) > 0 \text{ AND} \\ & (\#mot_mc_C_down + \#mot_mc_C_rep_crt + \\ & \#mot_mc_C_rep_deg + \#comp_mc_C_down + \\ & \#comp_mc_C_rep_crt + \#comp_mc_C_rep_deg) > 0); \end{aligned} $
mc_down → mc_up	T59	$ \begin{aligned} & (\#mot_mc_A_up + \#comp_mc_A_up + \#mot_mc_B_up + \\ & \#comp_mc_B_up + \#mot_mc_A_deg + \#comp_mc_A_deg + \\ & \#mot_mc_B_deg + \#comp_mc_B_deg) = 4 \text{ OR} \\ & (\#mot_mc_A_up + \#comp_mc_A_up + \#mot_mc_C_up + \\ & \#comp_mc_C_up + \#mot_mc_A_deg + \#comp_mc_A_deg + \\ & \#mot_mc_C_deg + \#comp_mc_C_deg) = 4 \text{ OR} \\ & (\#mot_mc_B_up + \#comp_mc_B_up + \#mot_mc_C_up + \\ & \#comp_mc_C_up + \#mot_mc_B_deg + \#comp_mc_B_deg + \\ & \#mot_mc_C_deg + \#comp_mc_C_deg) = 4; \end{aligned} $

Fonte: Autor.