GUILHERME EDUARDO DA CUNHA BARBOSA

**REENGENHARIA DE SISTEMAS NA RECUPERAÇÃO E
MODERNIZAÇÃO DE PRODUTOS: PROPOSTA DE UM MODELO
BASEADO EM RISCO**

SÃO PAULO

2015

GUILHERME EDUARDO DA CUNHA BARBOSA

**REENGENHARIA DE SISTEMAS NA RECUPERAÇÃO E
MODERNIZAÇÃO DE PRODUTOS: PROPOSTA DE UM MODELO
BASEADO EM RISCO**

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

SÃO PAULO

2015

GUILHERME EDUARDO DA CUNHA BARBOSA

**REENGENHARIA DE SISTEMAS NA RECUPERAÇÃO E
MODERNIZAÇÃO DE PRODUTOS: PROPOSTA DE UM MODELO
BASEADO EM RISCO**

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

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica de Projeto e
Fabricação

Orientador:

Prof. Dr. Gilberto Francisco M. de Souza

SÃO PAULO

2015

Este exemplar foi revisado e corrigido 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

Barbosa, Guilherme Eduardo da Cunha

Reengenharia de sistemas na recuperação e modernização de produtos:
proposta de um modelo baseado em risco / G. E. C. Barbosa -- versão corr. --
São Paulo, 2015.
274 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Sistemas 2.Modernização 3.Projeto 4.Confiabilidade 5.Risco
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

DEDICATÓRIA

Esta tese é dedicada aos oficiais, praças e técnicos do antigo PqRMM/2, cujos esforços na recuperação e modernização de viaturas blindadas culminaram no desenvolvimento de produtos de defesa nacionais que, além de se tornarem ícones de nossa indústria de material bélico, encheram os olhos de um garoto e influenciaram-no seriamente a seguir carreira como Engenheiro Militar.

AGRADECIMENTOS

Ainda que se trate de um trabalho assinado por um autor, a elaboração de uma tese jamais pode ser vista como um esforço solitário. Muitos contribuíram para que eu pudesse apresentar este trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao amigo e orientador Professor Gilberto Francisco Martha de Souza, pela confiança de mais de uma década e por todos os ensinamentos e conselhos dados.

Agradeço também aos meus chefes e Diretores do Arsenal de Guerra de São Paulo, pelo ensinamento técnico e profissional e pelo apoio em muitas de minhas iniciativas. Em especial, agradeço ao Sr. Coronel Robson Santana de Carvalho, ao Sr. Coronel Roberto Miranda Soares e ao Sr. Tenente-Coronel Otávio Augusto Burgardt, pelo enorme apoio que tive durante a condução das atividades do doutorado.

Agradeço à Diretoria de Fabricação e ao Departamento de Ciência e Tecnologia do Exército Brasileiro, pela oportunidade que me foi concedida e pelo apoio na participação nos congressos internacionais.

Ciente que minha dedicação acadêmica me fez ausente em algumas atividades de minha Organização Militar, agradeço a todos os meus companheiros do Arsenal de Guerra de São Paulo, que me auxiliaram e muitas vezes trabalharam por mim. Em especial, agradeço ao grande amigo, o Capitão William Pereira Coelho da Silva, que não apenas me ajudou nos assuntos da caserna, mas que foi um grande colaborador nos trabalhos desta tese.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Confiabilidade, pela excelente convivência e pelos momentos de discussão de ideias, os quais muito auxiliaram o andamento desta tese.

Agradeço também ao Sr. Odilon Lobo de Andrade Neto, da empresa Columbus e aos senhores Flávio e Moacir Schmitz, da empresa Universal Importação, Exportação e Comércio LTDA, pelo apoio dado por meio da disponibilização de dados e pelas várias consultas sobre o veículo analisado neste

trabalho. É um grande privilégio contar com a ajuda das maiores autoridades sobre os produtos da Engesa.

Ao Dr. Jones Gomide, cujas sessões de terapia muito me ajudaram, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos amigos e familiares, além de agradecimentos, devo um especial pedido de desculpas, pela atenção que deixei de lado. Em especial aos meus irmãos, Gustavo e Graziella e à minha avó Irene.

À minha querida esposa Sandra e aos meus filhos Mariana, Luís Guilherme e Gabriela, não apenas agradeço ou peço desculpas pela ausência. Eu gostaria de dizer que os amo e que vocês foram o maior sustentáculo de todo este trabalho, dividindo comigo tantos momentos e me proporcionando a maior razão em buscar vencê-lo.

Por fim, o último e mais importante agradecimento, eu dedico a Deus e aos meus pais, Elmo Barbosa (in memoriam) e Sônia Maria Cunha Barbosa, a quem tudo devo pelo que sou.

Vós, que tornais eloquente a língua das criancinhas, modelai minha palavra e derramai nos meus lábios a graça de vossa bênção. Dai-me a penetração da inteligência, a faculdade de lembrar-me, o método e a facilidade do estudo, a profundidade na interpretação e uma graça abundante de expressão.

(São Tomás de Aquino)

RESUMO

Produtos com um tempo considerável de utilização podem ser objeto de um processo de manutenção mais amplo e profundo, que visa prolongar a sua vida útil. O termo recuperação é aplicado a este tipo de manutenção, que visa à substituição de peças defeituosas, desgastadas, e/ou com a vida útil encerrada. O surgimento de novos paradigmas e de um novo conjunto de doutrinas operacionais pode mudar as expectativas e necessidades das partes interessadas de modo que o produto pode ser proposto para uma modernização. Assim, o produto pode ser reengenheirado durante a sua recuperação. Para realizar um projeto de recuperação e modernização, propõe-se uma abordagem em seis passos centrada numa decisão baseada no risco para classificar os componentes de acordo com a ação a ser realizada. A análise do produto é desenvolvida com base em técnicas de desmontagem e uma análise da fase operacional é realizada para as tomadas de decisões. Deste modo, um componente pode sofrer manutenção, ser modernizado, ser excluído, ser inserido ou permanecer fora do escopo dos trabalhos. O processo da gestão baseada em risco também inclui duas fases de monitoramento de risco continuado: durante a produção e na fase de operação. As decisões podem ser revistas pelo uso da análise bayesiana. Um estudo de caso é proposto para ilustrar o modelo num programa de recuperação e modernização de veículos blindados realizada numa unidade do Exército Brasileiro. A aplicação da metodologia permitiu a seleção de uma alternativa de modernização, considerando riscos e benefícios. O desdobramento das análises no projeto detalhado permitiu a definição final do escopo de recuperação e modernização, observando efeitos de propagação de alterações de engenharia. A principal contribuição deste trabalho é a formalização de um estudo da recuperação e modernização como projeto específico, descrevendo suas características de uma forma a permitir a aplicação de um modelo baseado em risco.

Palavras-chave: Sistemas. Modernização. Projeto. Confiabilidade. Risco.

ABSTRACT

Defense products with a considerable time of utilization may be subject to a broader and deeper maintenance process, which aims to extend their service life. The term overhaul is applied to this kind of maintenance, which aims the replacement of defective, worn, and/or parts with ended life. The rise of new paradigms and a new set of operational doctrines can change stakeholders' expectations and needs and the product can be proposed for modernization. Technological advances and some problems in supply chain also contribute to this frame. Then, the product can be reengineered during its overhaul. To perform an overhaul and modernization design, it is proposed a five-step approach centered in risk-based decision for classifying components according to action performed. Product analysis based on technical teardown and operation phase review gather data to perform decisions. In this way, a component can be maintained, modernized, excluded, inserted or considered out-of-scope. The risk-based management process also includes two phases of risk monitoring: during production and on operation phase. Decisions can be reviewed by the use of Bayesian analysis. A case is proposed to illustrate the model in a major overhaul program of Armored Fighting Vehicles performed in a Brazilian Army depot. The model aims to contribute to a better decision making to support engineering role in an overhaul and modernization design, considering risks and benefits. The deployment of the detailed design analysis allowed the final definition of overhaul and modernization scope, observing the propagation effects of engineering changes. The main contribution of this work is the formalization of a study of overhaul and modernization as a specific design, describing its characteristics in a way to allow the application of a risk-based model.

Keywords: Systems. Modernization. Design. Reliability. Risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fases do ciclo de vida do material.	36
Figura 2.2 - Processo de engenharia de sistemas.	38
Figura 2.3 – Fases da reengenharia do produto.	42
Figura 2.4 - Modelo de evolução do produto.	45
Figura 2.5 - Diversos modelos de DSM.	47
Figura 2.6 - Curva da taxa de falhas (banheira).	54
Figura 2.7 – Seis padrões de curvas da taxa de falhas.	56
Figura 2.8 - Modelos de FMEA e FMECA.	60
Figura 2.9 - Interação entre tipos de riscos na engenharia de sistemas.	73
Figura 2.10 - Quadro de interações de riscos em projeto.	74
Figura 2.11 - Modelo de gestão de riscos da ABNT ISO 31.000.	78
Figura 2.12 - Manutenção e desempenho funcional.	85
Figura 2.13 - Manutenção ao longo do ciclo de vida.	86
Figura 2.14 - Sequência de um processo de recuperação.	88
Figura 2.15 - Princípios de gestão de ativos.	91
Figura 2.16 - Estrutura de gestão da ABNT ISO 55.000.	92
Figura 2.17 - Modelo para modernização de sistemas legados.	97
Figura 2.18 - Modelo da ferradura para modernização de sistemas legados.	98
Figura 2.19 - Modelo para modernização de sistemas.	103
Figura 3.1 - Alterações de engenharia no produto e modernização.	106
Figura 3.2 - Modelo proposto para o projeto de recuperação e modernização.	109
Figura 3.3 - Método proposto para o projeto preliminar.	115
Figura 3.4 - Processo de recuperação e modernização.	120

Figura 3.5 - Processo proposto para o projeto detalhado de recuperação e modernização.....	135
Figura 4.1 - Viatura Blindada de Reconhecimento EE-9 Cascavel.	146
Figura 4.2 - Viatura Blindada de Transporte de Pessoal EE-11 Urutu.	148
Figura 4.3 - Subsistema de estudo.....	167
Figura 4.4 - Subsistema de estudo: suspensão dianteira.....	168
Figura 4.5 - Subsistema de estudo: eixo dianteiro (excluído o diferencial).....	169
Figura 4.6 - Configuração A3 proposta para o subsistema de estudo.....	170

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Distribuição de itens em relação a taxa de reposição.....	151
Gráfico 4.2 - Análise de sensibilidade.	165
Gráfico 4.3 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento bandeja por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição. .	179
Gráfico 4.4 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento haste por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição.....	180
Gráfico 4.5 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento mola por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição.....	181
Gráfico 4.6 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento semieixo por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição. .	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Resumo da terminologia adotada.....	31
Tabela 2.1 - Índice de severidade.	62
Tabela 2.2 - Índice de ocorrência. Fonte: DoD (1998).....	63
Tabela 2.3 - Índice de detecção.	63
Tabela 2.4 - Exemplo de HAZOP.	66
Tabela 2.5 - Percentuais de falhas para a distribuição de Weibull.	69
Tabela 3.1 - Questões sobre recuperação e modernização de um produto.....	108
Tabela 3.2 - Valores de severidade.....	116
Tabela 3.3 - Valores de Ocorrência.....	117
Tabela 3.4 - Classificação proposta para elementos. Fonte: autor.	124
Tabela 4.1 - Dados sobre os diversos modelos do EE-9 Cascavel e EE-11 Urutu.	147
Tabela 4.2 - Características técnicas das alternativas de configuração do EE-11 Urutu MII.....	153
Tabela 4.3 - Valores de NPR de componentes das alternativas.	156
Tabela 4.4 - Interações que partem da bomba de porão para os demais componentes.....	160
Tabela 4.5 - Interações para a bomba de porão e cálculo do NPR do componente.	161
Tabela 4.6 – Quadro descritivo das revisões de interações.	163
Tabela 4.7 - Análise de alternativas.	164
Tabela 4.8 - Quantidade de alterações em interações.....	166
Tabela 4.9 – Penalizações parametrizadas dos elementos da análise.	173
Tabela 4.10 - Análises de confiabilidade dos elementos selecionados.	173

Tabela 4.11 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um valor específico igual a zero.	174
Tabela 4.12 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um valor específico igual a 10%.....	175
Tabela 4.13 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um valor específico igual a 50%.....	175
Tabela 4.14 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um intervalo de valores possíveis [0%, 5%].	177
Tabela 4.15 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um intervalo de valores possíveis [0%,10%].	177
Tabela 4.16 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um intervalo de valores possíveis [0%,100%].	177
Tabela 4.17 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição em intervalos individualizados para cada elemento.	178

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise Crítica de Processo
AGSP	Arsenal de Guerra de São Paulo
AS/NZS	<i>Australian/New Zealand Standard</i> (prefixo indicativo de uma norma comum aos dois países)
BOM	<i>Bill-of-Materials</i>
BSI	<i>British Standard Institution</i>
COL	Contrato de Objetivos Logísticos
CRR	Carro de Reconhecimento sobre Rodas
CTIS	<i>Central Tire Inflate System</i>
DAU	<i>Defense Acquisition University</i>
DoD	<i>Department of Defense</i> (dos Estados Unidos da América)
DSM	<i>Design Structure Matrix</i>
EIA	<i>Electronic Industries Alliance</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha)
FMECA	<i>Failure Mode, Effect and Criticality Analysis</i> (Análise de Modos e Efeitos de Falha)
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i> (árvore de falhas)
Gsup	Sistema de Gestão do Suprimento (sistema de informações gerenciais próprio do AGSP)
GT-VMUC	Grupo de Trabalho - Viabilidade Técnica da Modernização do Urutu e Cascavel
HAZOP	<i>Hazard and Operability Studies</i>
IAM	<i>The Institute of Asset Management</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IG	Instruções Gerais (do Exército Brasileiro)
INCOSE	<i>International Council on Systems Engineering</i>
IODCT	Instrumentos de Observação, Direção e Controle de Tiro

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEM	Material de Emprego Militar
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NPR	Número de Prioridade de Risco
OHSAS	<i>Occupational Health and Safety Advisory Services</i>
PAS	<i>Publicly Available Specification</i>
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PDSA	<i>Plan-Do-Study-Act</i>
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
PqRMM/2	Parque Regional de Motomecanização da Segunda Região Militar
SEBoK	<i>Systems Engineering Book of Knowledge</i>
SLEP	<i>Service Life Extension Programa</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Alternativa de recuperação pura (projeto original)
A_i	i-ésima alternativa de modernização
C	custo unitário de aquisição do elemento
C_0	custo da alternativa A_0 (recuperação pura do produto original, projeto preliminar)
C_i	custo da alternativa A_i (modernização) (projeto preliminar)
C_{M1}	custo total de um elemento M1
C_{M2}	custo total de um elemento M2
C_{M3}	custo total de um elemento M3
C_{mod}	custo unitário de modificação do elemento de trabalho
CO_{M2}	expectativa de custos um elemento M2 durante operação
CO_{M3}	expectativa de custos um elemento M3 durante operação
CP_{M2}	expectativa de custos totais de produção de um elemento M2
CP_{M3}	expectativa de custos totais de produção para um elemento M3
CP_{R2}	custos de produção de um elemento R2
C_{R1}	custo total de um elemento M1
C_{Rep}	custo unitário do processo de restauração/reparação
CT_{Rep}	expectativa de custos totais de restauração/reparação
CTP	custo total do reprojeto (projeto e aprovação do elemento de trabalho)
FI	fator de impacto de uma interação
i	índice da alternativa de modernização (projeto preliminar)
j	índice do componente (projeto preliminar)
m	quantidade de componentes da matrix DSM do projeto preliminar
$M0$	Classificação de elemento de manutenção, simples, não considerados

nas análises

M1	Classificação de elemento de manutenção com reposição mandatória
M2	Classificação de elemento de manutenção com inspeção + reposição (se necessária).
M3	Classificação de elemento de manutenção com inspeção + reposição ou restauração
n	quantidade de valores assinalados de contribuições de risco (projeto preliminar)
N	quantidade total de unidades do elemento
O	ocorrência numa determinada interação (projeto preliminar)
$P(x)$	probabilidade de a produção demandar exatamente x sobressalentes, conforme uma distribuição binomial.
P_f	penalização por falha durante a operação
P_{il}	penalização por aquisição emergencial
P_{ix}	penalização do excesso de sobressalentes após produção
P_{pd}	penalização por parada de produção
q	quantidade adquirida de sobressalentes do elemento
R0	Classificação de elemento de reprojeto, simples, não considerados nas análises
R1	Classificação de elemento de reprojeto, evolução
R2	Classificação de elemento de reprojeto, modificação
$R(T_{NOP})$	Confiabilidade em TNOP (Tempo de nova operação)
$R(T_{NOP} \text{reparado})$	Confiabilidade em TNOP, condicional ao reparo/restauração
$R(T_{NOP} \text{sobreviveu } T_0)$	Confiabilidade em TNOP, condicional ao aproveitamento
$R_R(T_{NOP})$	Confiabilidade em TNOP do elemento reprojetoado
$\mathfrak{R}_0$	risco da alternativa A0 (Configuração original)
$\mathfrak{R}_i$	risco da alternativa Ai (Configuração de modernização)

S	severidade máxima do componente (projeto preliminar)
TR	taxa de reposição
x	variável da quantidade de sobressalentes do elemento de trabalho
[a, b]	intervalo de valores para TR

SUMÁRIO

1	Introdução	28
1.1	Recuperação: quando é necessária uma grande manutenção do produto ..	28
1.2	Modernização: quando é necessário alterar o projeto do produto.....	29
1.3	Recuperação e modernização: terminologia empregada nesta obra	30
1.4	Objetivo do trabalho	31
1.5	Materiais e métodos	32
1.6	Estrutura do trabalho.....	32
2	Fundamentação teórica.....	34
2.1	Engenharia e Reengenharia de sistemas	34
2.1.1	Engenharia de sistemas	35
2.1.1.1	Conceitos principais	35
2.1.1.2	Ciclo de vida.....	36
2.1.1.3	Processo de engenharia de sistemas	36
2.1.1.4	Sistemas, subsistemas e a arquitetura de sistemas	37
2.1.2	Reengenharia de sistemas	39
2.1.2.1	Conceitos	40
2.2	Reprojeto.....	44
2.2.1	Engenharia reversa para a reengenharia de um sistema	44
2.2.2	Matriz de Estrutura de Projeto - <i>Design Structure Matrix</i> (DSM)	47
2.2.3	Análise de alterações de engenharia.....	50
2.3	Confiabilidade.....	51

2.3.1	Conceitos matemáticos	52
2.3.2	Ferramentas de confiabilidade empregadas nesta tese	56
2.3.2.1	Análise de modos, efeitos e criticidade de falha	56
2.3.2.1.1	FMEA: Análise de modos e efeitos de falha	57
2.3.2.1.2	Análise de criticidade.....	61
2.3.2.2	HAZOP – Análise crítica de processo	63
2.3.3	Obtenção da confiabilidade de componentes a partir de um histórico de consumo.....	66
2.3.3.1	Distribuição de Weibull.....	67
2.3.3.2	Metodologia de cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull	68
2.4	Gestão de Riscos	70
2.4.1	Conceitos gerais e definição de risco	70
2.4.2	Análise de riscos.....	71
2.4.3	Gestão de riscos em engenharia de sistemas	72
2.4.4	Gestão de riscos na reengenharia de sistemas	76
2.4.5	ABNT ISO 31.000	77
2.5	Tópicos de estatística bayesiana	79
2.5.1	Probabilidade condicional e teorema de Bayes	80
2.5.2	Inferência bayesiana.....	82
2.5.2.1	Inferência bayesiana de variáveis aleatórias discretas empregando distribuições a priori discretas.....	82
2.6	Manutenção.....	83
2.6.1	Manutenção e ciclo de vida	84

2.6.2	Gestão da manutenção	87
2.6.2.1	Modelos de Recuperação	88
2.6.2.2	Extensão da vida útil	89
2.6.3	Gestão de ativos físicos.....	89
2.6.3.1	Sistema de gestão de ativos	91
2.6.3.2	O papel de gestão de riscos na gestão de ativos físicos.....	93
2.6.4	Manutenção e confiabilidade: processo de renovação generalizado.....	94
2.7	Algumas contribuições sobre modernização de sistemas	96
2.7.1	Modernização de sistemas legados.....	96
2.7.2	Recuperação e modernização de sistemas de grande porte.....	99
2.7.3	Consideração sobre riscos e oportunidades na infusão de tecnologia no projeto de sistemas	100
2.7.4	Outras contribuições.....	102
3	Metodologia proposta para a gestão de projetos de recuperação e modernização.....	104
3.1	Considerações sobre a metodologia proposta para a recuperação e modernização	104
3.1.1	Da aplicação da metodologia proposta.....	104
3.1.2	Do projeto de recuperação e modernização	104
3.1.3	Das alterações de engenharia	105
3.1.4	Da manutenção de componentes	107
3.1.5	Binômio recuperação/modernização	107

3.2	A metodologia proposta	108
3.3	Primeiro passo: análise do produto	109
3.4	Segundo passo: análise da operação do produto	111
3.5	Terceiro passo: projeto preliminar	111
3.5.1	Análise do projeto original.....	112
3.5.2	Análise de alternativas.....	117
3.5.3	Seleção da alternativa de modernização	118
3.6	Quarto passo: projeto detalhado	119
3.6.1	Custos e penalizações associados aos elementos de trabalho.....	121
3.6.1.1	Custos que são desprezados no método	121
3.6.1.2	Custos que são considerados no método	122
3.6.1.3	Penalizações.....	122
3.6.2	classificação proposta dos elementos de trabalho e suas relações de custos	123
3.6.2.1	Elementos M0/R0.....	125
3.6.2.2	Elementos M1	125
3.6.2.3	Elementos M2	126
3.6.2.4	Elementos M3	129
3.6.2.5	Elementos R1.....	131
3.6.2.6	Elementos R2.....	131
3.6.2.7	Elementos fora de escopo.....	133
3.6.2.8	Elementos de inserção.....	133
3.6.2.9	Elementos de exclusão	134
3.6.3	Método proposto para o projeto detalhado de recuperação e modernização.....	134

3.6.3.1	Detalhamento do projeto da alternativa selecionada	134
3.6.3.2	Análises individuais do elemento	135
3.6.3.2.1	Análise técnica do elemento.....	135
3.6.3.2.2	Análise de manutenibilidade	136
3.6.3.2.3	Análise de suporte.....	137
3.6.3.3	Análise de expectativas de custos	137
3.6.3.4	Análise de reprojeto	139
3.6.3.4.1	Montagem da DSM: identificação de dependências entre elementos.....	140
3.6.3.4.2	Roteiro da análise de reprojeto nas dependências	141
3.6.3.5	Encerramento do projeto detalhado: definição do projeto de recuperação e modernização	141
3.7	Quinto passo: gestão contínua de riscos durante produção	142
3.8	Sexto passo: gestão de ativos na nova fase de operação	142
3.9	Considerações Finais: análise da metodologia proposta e de suas contribuições.....	143
4	Aplicação dos métodos propostos em processos de recuperação e modernização de viaturas blindadas sobre rodas	145
4.1	Recuperação e modernização de viaturas blindadas no Brasil e a motivação desta obra.....	145
4.1.1	Os veículos Engesa e o EE-11 Urutu, que serve como estudo de caso nesta obra	146
4.1.2	Recuperação e modernização dos veículos Engesa	148
4.1.3	O projeto Fênix e seus desdobramentos	149
4.1.4	A necessidade de modernização do EE-11 Urutu MII	151
4.2	Sobre a aplicação da metodologia proposta	152
4.3	Estudo de caso sobre projeto preliminar	153

4.3.1	Análise do projeto original.....	155
4.3.2	Apresentação de alternativas de modernização	158
4.3.2.1	Alternativa A1	159
4.3.2.2	Alternativa A2.....	159
4.3.2.3	Alternativa A3.....	159
4.3.3	Ilustrando a análise de um componente	160
4.3.3.1	A bomba de porão original	161
4.3.3.2	A bomba de porão modernizada	162
4.3.4	Análise de alternativas.....	162
4.3.5	Seleção das alternativas.....	163
4.4	Estudo de caso sobre projeto detalhado	166
4.4.1	Análise dos elementos de trabalho: técnica, de manutenibilidade e de suporte	170
4.4.2	Análise de expectativas de custos.....	172
4.4.2.1	Taxa de reposição como um valor específico	174
4.4.2.2	Taxa de reposição como uma intervalo de valores	176
4.4.2.3	Taxa de reposição desconhecida, com atualização bayesiana durante a produção.....	178
4.4.3	Análise de dependências.....	182
4.4.4	Análise de reprojeção	183
4.4.4.1	Elemento 5.19 munhão	183
4.4.4.2	Elemento 5.23 ponteira	184
4.4.4.3	Elemento 5.25 defletor	185

4.4.4.4	Elemento 5.51 cubo	185
4.4.4.5	Elemento 5.44 prato de freio	186
4.4.4.6	Elemento 5.55 pinça de freio.....	186
4.4.4.7	Encerramento da análise	187
4.5	Discussão sobre o estudo de caso.....	187
5	Conclusões sobre a metodologia e sua aplicação	190
5.1	Do projeto preliminar	190
5.2	Do projeto detalhado	192
5.2.1	Da classificação dos elementos de trabalho e o uso da taxa de reposição.....	192
5.2.2	Da análise de reprojeto.....	193
5.3	Contribuições da metodologia proposta	194
6	Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	195
6.1	Conclusões.....	195
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	196
Apêndice A – Componentes empregados no projeto preliminar no caso exemplo .		208
Apêndice B – DSM da configuração original da análise do projeto preliminar do caso exemplo.....		223
Apêndice C – DSM da primeira configuração de modernização (A1) da análise do projeto preliminar do caso exemplo.....		224
Apêndice D – DSM da segunda configuração de modernização (A2) da análise do projeto preliminar do caso exemplo.....		225
Apêndice E – DSM da terceira configuração de modernização (A3) da análise do projeto preliminar do caso exemplo.....		226
Apêndice F – Planilha de trabalho do projeto detalhado do caso exemplo: antes da análise de reprojeto		227

Apêndice G - Planilha de trabalho do projeto detalhado do caso exemplo: depois da análise de reprojeto	228
Apêndice H – análises de interações das configurações	229

1 Introdução

1.1 Recuperação: quando é necessária uma grande manutenção do produto

A antiga norma MIL-STD-721 (*Definition of terms for reliability and maintainability*), (DOD, 1981), define manutenção como “todas as ações necessárias para manter ou restaurar um item dentro de uma condição específica”. Ao longo de seu ciclo de vida, um produto está sujeito a vários tipos de manutenção, que são definidos dentro de uma política própria. O rol de atividades de manutenção abrange desde tarefas simples e rotineiras até grandes intervenções, podendo ser programadas ou não.

Um determinado produto que apresenta um longo tempo de utilização pode ser submetido a uma manutenção mais ampla e complexa, que objetiva prolongar sua vida útil¹ e retornar o produto a um estado de “quase novo”, ou “como se novo fosse”. Em geral, dá-se o nome de *overhaul* a este tipo de trabalho de manutenção, que visa à substituição de peças defeituosas, desgastadas e/ou com a vida útil encerrada, (MOBLEY et al, 2008).

Neste texto, o termo *overhaul* é traduzido por recuperação, de forma a distingui-lo dos demais tipos de procedimentos de manutenção, enfatizando o seu caráter de atividade de revitalização de um produto que atingiu fases finais de sua vida útil. Assim, espera-se que a recuperação de um sistema ou produto, como uma frota de veículos blindados, seja tratada como atividade complexa o suficiente para exigir um tratamento específico de engenharia e de planejamento e controle da produção.

A recuperação é ampla por abranger a totalidade do produto ou ter um escopo próximo desta totalidade. A recuperação é complexa porque o produto é

---

¹ Este trabalho adota a definição de vida útil ou de serviço como o tempo que se inicia com a entrada em operação do sistema e termina com a sua retirada ou descarte, (PYSTER et al, 2014). Não se discutem aqui as razões que determinam o tempo desta vida, entendendo-se que ela pode ser determinada por um processo decisório que analisa as alternativas para o sistema. Na verdade, esta tese propõe um modelo a ser implantado dentro de um projeto de recuperação e modernização, considerando que tal processo decisório já definiu por esta alternativa.

sucessivamente desmontado em partes menores até que ações de manutenção possam ser processadas. Não se trata de esforços pontuais e/ou dirigidos a alguns poucos componentes.

Uma revisão de literatura sobre organizações de MRO (*Maintenance, Repair and Overhaul*), conduzida por Ayeni et al. (2011), destaca o problema da incerteza e da falta de acurácia na previsão de operações dessas organizações, o que prejudica a aplicação de conceitos de produção enxuta. Neste mesmo contexto, Egbu, Young e Torrance (1998) concluíram que o planejamento, precisão e eficácia na gestão de grandes empreendimentos de recuperação, em grande parte são afetados por riscos e incerteza, cujo gerenciamento faz-se bastante necessário.

1.2 Modernização: quando é necessário alterar o projeto do produto

Como discutido anteriormente, o processo de recuperação de um produto pode ser uma solução para o prolongamento de sua vida útil. Entretanto, tal ideia traz em si um problema ligado à idade do produto. Como se trata de um projeto realizado há anos ou até mesmo décadas, observa-se que o envelhecimento do produto não é verificado apenas na idade de seus componentes. Mudanças de paradigmas e o surgimento de novas doutrinas de emprego podem alterar o conjunto de expectativas e necessidades dos usuários do sistema. O avanço tecnológico também contribui para o envelhecimento do sistema, uma vez que novos materiais e componentes são desenvolvidos e passam a ser mais vantajosos que os originais. Novos conceitos também surgem. Componentes eletrônicos são cada vez mais empregados – motores diesel eletrônicos são ótimos exemplos disso – e, manter o produto em sua concepção original passa a ser cada vez mais oneroso. Cria-se, então, um ambiente que favorece a proposição de modernizar o projeto original.

A modernização de um sistema também pode ser entendida como uma modificação do seu projeto original a partir da evolução², modificação, inserção ou exclusão de alguns de seus componentes. Pode-se modernizar um componente por

---

² Neste texto, evolução é entendida pela substituição de um item original por outro, diferente em termos de projeto. Por sua vez, modificação de um item é, neste texto, a alteração de engenharia imposta a um item, modificando seu projeto de forma localizada.

meio de sua evolução – substituição por um novo modelo (troca de um motor por outro mais potente) ou introduzir algumas alterações no próprio componente original, como é o caso de modificações de geometria para uma adaptação (talvez o novo motor exija uma nova posição, que é obtida a partir de alterações da geometria de um suporte). Em termos práticos, reprojetar um componente significa alterar a lista de materiais do produto ou seu catálogo de peças, trocando o código da peça por outro. A partir do mesmo raciocínio, inserir novos componentes significa adicionar itens à lista de materiais e excluir componentes, remover itens.

1.3 Recuperação e modernização: terminologia empregada nesta obra

O assunto “recuperação e modernização” é interessante em vários aspectos. O primeiro deles é a profusão de termos, que, a rigor, podem possuir o mesmo significado. Além de modernização, são encontradas na literatura técnica as expressões *upgrade*, repotencialização (especialmente quando se trata de nova motorização em veículos), repotenciamento, *major rebuild*, *major overhaul* e manutenção modificadora.

Vale ressaltar que muito dos termos empregados para a recuperação e modernização são comuns na área de defesa, no qual vários sistemas precisam ser recuperados e/ou modernizados em virtude dos altos custos de uma nova aquisição.

No Exército Brasileiro, as Instruções gerais para o modelo administrativo do ciclo de vida dos materiais de emprego militar (IG 20-12), (EXÉRCITO BRASILEIRO, 1994), determinam que, ao final da vida útil, o material poderá ser submetido à modernização, aperfeiçoamento, nacionalização ou à sua alienação.

O Departamento de Defesa norte-americano ainda apresenta os termos *depot maintenance* – definido como todos os trabalhos de inspeção, manutenção, recuperação, modificação ou reconstrução do material, desenvolvido nos *depots* (cujos equivalente no Exército Brasileiro são os Arsenais), com o uso extensivo de instalações, maquinário e equipamento industrial - e *Service Life Extension Program* (SLEP) – definido como programas que almejam prolongar a vida operacional de determinado material, (DOD, 2013)

Outros aspectos interessantes do processo de modernizar um produto estão no quadro de semelhanças e diferenças em relação ao projeto e desenvolvimento de um produto. O projeto de um novo produto pode ser entendido por um processo que transforma uma série de abstrações (necessidades, requisitos, restrições, técnicas, modelos) em algo físico, concreto. Em um projeto de modernização, parte-se do concreto produto original para um novo produto (modernizado), por um caminho que também comporta uma série de abstrações, mas que são obviamente restringidas pelo projeto original. Outra diferença: uma vez determinado o projeto de um produto novo, este pode ser fabricado amplamente, o que não acontece com a modernização, que só pode ser aplicada às unidades existentes do produto. Na fabricação de um novo produto, diversas operações de fabricação ou processos de manufatura tornam o produto fisicamente realizável. Na modernização, é preciso desmontar o produto, realizar operações de fabricação e manutenção e remontá-lo.

A presente obra trabalha com um conjunto de termos associados ao conceito recuperação e modernização que precisam ser definidos para uma melhor compreensão pelo leitor. A Tabela 1.1 resume a terminologia adotada neste texto, em relação ao tipo de trabalho adotado e de acordo com os efeitos em projeto.

Tabela 1.1 - Resumo da terminologia adotada.

<i>Processo</i>	<i>Tipo de trabalho</i>	<i>Resultados</i>	<i>Efeitos em projeto</i>
Recuperação	Manutenção	Aproveitamento – um componente é mantido após a manutenção. Reposição – um componente é repostado por outro de mesmo modelo.	Não há alteração.
Modernização	Reprojeto	Evolução – item substituído por outro modelo. Modificação – projeto do item é alterado.	Há alteração do projeto original.

Fonte: autor.

1.4 Objetivo do trabalho

O principal objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de gestão técnica a ser implantada em projetos de recuperação e de modernização de produtos. A partir de uma discussão sobre engenharia de sistemas, pretende-se apresentar um modelo baseado em risco. A ideia do modelo baseado em risco é

auxiliar algumas das tomadas de decisão que o projetista venha a realizar durante uma fase de projeto de engenharia. Mais precisamente, as decisões que determinam o que ocorrerá com cada um dos numerosos componentes do produto.

1.5 Materiais e métodos

Para conseguir o objetivo proposto, pretende-se estudar conceitos específicos relativos à manutenção e ao reprojetado do produto, tipos de trabalhos ligados à recuperação e modernização, respectivamente.

Em relação à manutenção, observa-se como esta é inserida dentro do contexto em análise, tendo em vista a boa parcela do produto que se mantém dentro de seu projeto original. Questões relativas ao risco do aproveitamento de componentes são estudadas, influenciando a metodologia proposta.

Já em relação à modernização do produto, são estudadas as principais contribuições que podem ser aproveitadas dentro desta pesquisa. São analisadas as questões de como essas alterações de engenharia influenciam os demais componentes do produto. Em termos de riscos, como as alterações propostas dentro de uma modernização influenciam o perfil de risco do produto.

A revisão da literatura permite estabelecer um modelo adequado ao propósito deste trabalho. Este modelo é testado dentro de uma aplicação real, com a comparação de seus resultados com observações vivenciadas dentro de um programa de recuperação e modernização de um produto de defesa.

1.6 Estrutura do trabalho

Esta tese está dividida em seis capítulos, sendo o primeiro dedicado a esta introdução. A fundamentação teórica, necessária para a compreensão do modelo, é apresentada ao longo do segundo capítulo. Em linhas gerais, há uma breve introdução à engenharia de sistemas, bem como ao conceito de reengenharia de sistemas. Tópicos de confiabilidade e risco são expostos, bem como uma breve discussão sobre manutenção.

O modelo proposto está apresentado no terceiro capítulo, junto com alguns conceitos fundamentais para sua aplicação, sendo reservado o quarto capítulo para aplicação e validação do modelo proposto.

Há um capítulo especificamente dedicado às conclusões sobre a metodologia proposta (capítulo cinco).

As conclusões gerais e os apontamentos para trabalhos futuros são apresentados no sexto e último capítulo.

2 Fundamentação teórica

O presente capítulo apresenta um extrato de conceitos teóricos para a compreensão do problema estudado. Para alcançar a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho, é feita uma breve introdução à engenharia de sistemas. É apresentado o conceito de reengenharia de sistemas, cujo enfoque é o tema desta obra. A ideia de reprojeto e de modernização também é apresentada, com destaque para a ferramenta DSM (*Design Structure Matrix*). Conceitos de confiabilidade e risco são discutidos, pois o método a ser proposto vale-se de seus conceitos para uma tomada de decisão. Ao final do capítulo, são apresentadas algumas referências mais dedicadas ao assunto da tese.

2.1 Engenharia e Reengenharia de sistemas

A complexidade de alguns produtos desenvolvidos e produzidos ultrapassa a ideia de uma abordagem comum, requerendo uma tratativa que os fazem ser compreendidos como sistemas. De acordo com Blanchard e Fabrycky, (2006), não é fácil apresentar uma definição rigorosa de sistemas de engenharia³, porém estes podem ser identificados a partir das seguintes características:

1. Sistemas de engenharia têm uma função de projeto para atender uma necessidade identificada e permitem que seja atingido o objetivo operacional estabelecido.
2. Sistemas de engenharia são trazidos à existência (criados) e operados dentro de um ciclo de vida, que se inicia com uma necessidade e termina com a retirada do material em serviço (descarte ou reciclagem).
3. Sistemas de engenharia são compostos por uma combinação de recursos finitos: equipe de trabalho, informação, software, materiais, equipamentos, instalações e custos.
4. Sistemas de engenharia são compostos de subsistemas e itens que interagem entre si para produzir a resposta ou comportamento do sistema.

---

³ Tal denominação faz-se necessária para diferencia-los de sistemas naturais (por exemplo, organismos, ecossistemas, etc.)

2.1.1 Engenharia de sistemas

Como disciplina, a engenharia de sistemas possui obras clássicas como os livros de Blanchard e Fabrycky (2006), Kossiakoff et al (2011) e o extenso manual compilado por Sage (2009). Organizações que trabalham com projetos de sistemas também costumam publicar manuais, como o da NASA (2007) e o da *Defense Acquisition University* (DAU) (2001). Além disso, o *International Council on Systems Engineering* (INCOSE), entidade sem fins lucrativos, possui um manual próprio (INCOSE, 2006). Recentemente, um contrato do Departamento de Defesa norte-americano viabilizou a elaboração e publicação do *Systems Engineering Book of Knowledge* (SEBoK) (PYSTER et al, 2014), disponível em <http://www.sebokwiki.org>, que foi desenvolvido e é atualizado por dezenas de autores e está apresentado em formato *wiki*, com recursos de buscas e navegação.

2.1.1.1 Conceitos principais

Apesar de ser direcionado para a atividade fim de sua organização, o *NASA Systems Engineering Handbook* (NASA, 2007) traz uma página de introdução à engenharia de sistemas, que pode ser parcialmente reproduzida neste texto para apresentação de definições desta disciplina:

Engenharia de sistemas é uma abordagem metódica e disciplinada para o projeto, realização, gestão técnica, operações e retirada de um sistema. Um "sistema" é uma construção ou um conjunto de elementos diferentes que, em conjunto (conectados), produzem resultados que não podem ser obtidos por meio dos elementos isolados. Os elementos, ou partes, podem incluir pessoas, hardware, software, instalações, políticas e documentos, ou seja, todas as coisas necessárias para produzir resultados no nível de sistema. Os resultados incluem qualidades, propriedades, características, funções, comportamento e desempenho. O valor adicionado pelo sistema como um todo (...) é criado principalmente pela relação entre as partes, ou seja, como elas são interconectadas. É uma maneira de olhar para o "quadro completo", quando se toma decisões técnicas. (...) Engenharia de sistemas é a arte e a ciência de desenvolver um sistema operacional capaz de atender requisitos dentro das restrições, muitas vezes conflitantes. Engenharia de sistemas é uma abordagem holística, disciplina integradora, em que as contribuições de várias disciplinas são avaliadas e equilibradas, (NASA, 2007, tradução nossa).

2.1.1.2 Ciclo de vida

Blanchard e Fabrycky (2006) argumentam que é fundamental para a engenharia de sistemas o entendimento e a compreensão de seu ciclo de vida. Apresentado na Figura 2.1 – que reproduz uma ilustração do livro dos autores – o ciclo de vida de um sistema é dividido em duas fases: a aquisição e a fase de utilização ou operação. A fase de aquisição do sistema está subdividida nas etapas de projeto preliminar ou conceitual, projeto detalhado e a produção ou construção do sistema. A fase de utilização envolve o emprego do sistema, as diversas ações de suporte ao sistema e, por fim, a sua retirada do serviço. Obviamente, cada instituição e/ou autor apresenta variações da estrutura do ciclo de vida de um sistema em relação a esse modelo.

Figura 2.1 - Fases do ciclo de vida do material.

Fonte: Blanchard e Fabrycky (2006).

2.1.1.3 Processo de engenharia de sistemas

O processo de desenvolvimento da engenharia de sistemas apresenta variações entre autores e/ou instituições. Em Kossiakoff et al (2011), é possível encontrar uma comparação entre modelos de processos apresentados nas normas MIL-STD-499B, IEEE-1220, EIA-STD-632 e ISO-IEC-IEEE-STD-15288. Após as devidas discussões, os autores apresentam um método sintético composto de quatro atividades básicas:

1. Análise de requisitos (definição do problema), que envolve o processo de consolidação de entradas para o projeto, o que inclui requisitos, planejamentos e modelos. Também busca compreender o complexo quadro

formado por requisitos, necessidades, restrições, ambiente de operação e outros objetivos.

2. Definição funcional (análise e alocação de funções), que busca converter os requisitos (porquês) nas funções que o sistema deve desempenhar (como). Os requisitos são alocados em blocos de funções e busca-se compreender a interação entre os elementos funcionais.
3. Definição física (síntese, análise física e alocação), que inclui a síntese de alternativas, seleção da mais apropriada e a elaboração do projeto no nível de detalhamento necessário.
4. Validação do projeto (verificação e avaliação), que, a partir de um modelo do ambiente no qual o sistema está inserido, simula ou testa a solução adotada, permitindo também interações necessárias para revisões do sistema.

A Figura 2.2 representa o modelo de Kossiakoff (parte superior da mesma) e o modelo clássico do processo de engenharia de sistemas apresentado na norma MIL-STD-499B (DOD, 1993), que está apresentado neste texto devido a sua simplicidade e difusão. A comparação entre os modelos permite compreender o caminho de sucessivas transformações desde a verificação de uma necessidade até a solução do problema, que é o sistema que foi desenvolvido por meio do processo.

2.1.1.4 **Sistemas, subsistemas e a arquitetura de sistemas**

Kossiakoff et al (2011) apresentam uma estrutura hierárquica composta pelas seguintes terminologias, em ordem decrescente: sistema, subsistema, componentes, subcomponentes e peças. Esta estrutura é particular a cada sistema, o que define uma arquitetura do produto.

Figura 2.2 - Processo de engenharia de sistemas.

Fonte: Kossiakoff (2011).

Tomando como um exemplo, um sistema que é definido por um veículo militar, haveria, no caso, subsistema elétrico, assim como subsistemas de trem de força, direção, freio, ar comprimido, entre outros. No subsistema elétrico, há componentes como o alternador, que pode ser desmembrado em subcomponentes (e.g.: regulador de tensão) e em peças (e.g.: um capacitor). Entretanto, ao se

considerar o veículo dentro de um sistema formado por várias unidades deste veículo (um regimento de carros de combate), é oportuno empregar uma nova nomenclatura, como “supersistema” ou o termo militar sistema de sistemas – do inglês *SoS, System of Systems* – (Kossiakoff et al, 2011).

Toda essa discussão ressalta a importância de se estabelecer o “sistema de interesse”, bem definido por suas fronteiras, no qual se aplicará a engenharia de sistemas, bem como compreender a inserção desse sistema dentro de seu ambiente.

De Weck et al. (2012) contribuem para esta discussão, apresentando uma interessante metáfora, construída a partir da observação de um objeto (problema) por alguém dentro de um helicóptero, cuja altitude relaciona-se ao nível de detalhamento e o ponto de vista é representado pela posição horizontal da aeronave – ao se posicionar o helicóptero em grande altitude, tem-se uma visão de maior abrangência, porém menos detalhada; por outro lado, uma baixa altitude revela maior detalhamento, mas também passa a depender muito do ponto de vista adotado.

Pimmler e Eppinger (1994) argumentam que a arquitetura de um produto está fortemente associada às características técnicas e organizacionais de seu projetista: estratégia de desenvolvimento de produtos, capacidade de produção, e filosofias de projeto, entre outras.

2.1.2 Reengenharia de sistemas

De acordo com Sage (2009), se um sistema é desenvolvido e gerenciado de acordo com a disciplina de engenharia de sistemas, ele pode ser transformado a partir dos mesmos processos e métodos, dentro do que o autor denomina como reengenharia de sistemas. Ainda de acordo com o autor, o conceito de reengenharia de sistemas pode ser aplicado basicamente em três grupos, ou numa combinação desses. Os grupos identificados por Sage (2009) são: gestão de sistemas, processos e produtos. Para fins de fundamentação teórica desta tese, apenas a reengenharia do produto é detalhada nesta seção.

2.1.2.1 Conceitos

Sage (2009) identifica duas importantes características da reengenharia: o fato de que ela aumenta o próprio entendimento sobre o produto e que ela objetiva aumentar índices de confiabilidade, manutenibilidade ou atender a uma nova necessidade do cliente. A definição formal que o autor dá para a reengenharia do produto é:

(...) o exame, estudo, captura e modificação dos mecanismos internos ou da funcionalidade de um sistema existente de modo a reconstruí-lo numa nova forma e com novas características, para se tirar vantagem de tecnologias emergentes, porém sem uma alteração significativa na funcionalidade inerente e finalidade do sistema, (SAGE, 2009).

De acordo com Chikofsky e Cross (1990), podem ser estabelecidas três importantes fases na engenharia de sistemas: definição, desenvolvimento e implantação do produto. O processo normal de engenharia do produto segue essa sequência por meio do que os autores denominam “engenharia avante”⁴ (*forward engineering*). Dentro de um processo de reengenharia de sistemas, Sage (2009) estabelece que a reengenharia do produto desenvolve-se inicialmente na sequência inversa dessas fases para depois retornar ao sentido comum definição-desenvolvimento-implantação. Uma lista de definições de termos presentes na reengenharia do produto é proposta por Sage (2009):

1. “Engenharia avante” (*forward engineering*) é o tradicional processo de definição, desenvolvimento e implantação de um produto, ou a realização de um conceito de sistema como um produto.
2. Engenharia reversa, por vezes, chamado de engenharia inversa, é o processo por meio do qual um dado produto é examinado para identificar ou especificar a definição do produto, quer no nível de especificações técnicas ou no nível de requisitos do usuário. Sage (2009) também apresenta dentro da definição de engenharia reversa os seguintes subconjuntos:
  - a. “Redocumentação” é o processo pelo qual uma representação do sistema ou produto é recriada com a finalidade de gerar explicações

---

⁴ Os autores argumentam que o termo *forward* só se faz necessário para distinguir de *reverse*.

funcionais do comportamento do sistema original, o que permite um melhor conhecimento do sistema em níveis funcionais e estruturais.

- b. Recuperação do projeto é o subprocesso de engenharia reversa pelo qual o conhecimento “redocumentado” é combinado com outros esforços, muitas vezes envolvendo as experiências pessoais e o conhecimento de outras pessoas sobre o sistema, que permite levar a abstrações funcionais do produto ou a compreensão do sistema no nível de função, finalidade e estrutura.
3. Reestruturação, que envolve a transformação de informações obtidas pela engenharia reversa noutra forma de representação.
4. Reengenharia é, como definido nesses esforços, o equivalente a engenharia do “redesenvolvimento”, da renovação e da recuperação. Está muito relacionada a questões de manutenção e aproveitamento do produto sendo, essencialmente, a recriação do sistema original numa nova forma que foi melhorada sem modificações radicais em seu propósito e funcionalidades.

Sage (2009) representa graficamente os conceitos propostos, como exposto na Figura 2.3. Segundo o autor, o esforço de reestruturação, baseado na redocumentação e na recuperação do conhecimento obtido por intermédio da engenharia reversa, é usado para efetivamente reestruturar cada uma das três fases (definição-desenvolvimento-implantação).

É importante considerar dentro da visão de Sage (2009) a ligação da reengenharia do produto com a manutenção. Não se pode desprezar o fato de que boa parte do produto reengenheirado é reaproveitada, o que requer ações para garantir que esses componentes desempenhem satisfatoriamente suas funções. Em suas conclusões, o autor ainda alerta para o fato de que a reengenharia de um produto também está relacionada à reengenharia de processos correlatos e da gestão de sistemas.

Figura 2.3 – Fases da reengenharia do produto.

Fonte: Sage (2009).

Kossiakoff et al. (2011) não utilizam o termo reengenharia de sistemas, mas afirmam que a modernização possui fases similares ao do desenvolvimento de novos sistemas. Empregando a divisão por fases que os autores postulam, tem-se:

1. Fase de desenvolvimento conceitual – assim como no início do projeto de novos sistemas, esta fase é iniciada pelo reconhecimento de sua necessidade e é desenvolvida de maneira similar, exceto pelo fato de que o escopo de decisões de engenharia está limitado às modificações. Como fator complicador, é necessário um grande esforço para que as partes modificadas do sistema sejam compatíveis com as remanescentes, o que requer, segundo Kossiakoff et al. (2011), o emprego de engenharia de sistemas de alto nível para se atingir metas assumidas de desempenho e confiabilidade.
2. Fase de desenvolvimento de engenharia – limita-se aos componentes modernizados e à sua integração com os demais, também exigindo esforços consideráveis para seu sucesso.
3. Teste e avaliação do sistema – podem estar limitados às modificações, porém é possível que modernizações mais abrangentes exijam a avaliação do sistema como um todo.

4. Operação e suporte – os autores alertam para as modificações no suporte logístico, especialmente em estoques de peças de reposição. Alertam também para questões de treinamento, elaboração de manuais e documentação técnica.

A *Defense Acquisition University*, no seu manual de engenharia de sistemas (DAU, 2001), apresenta o termo *major rebuild* para denominar a gama de processos de modernização em larga escala, que inclui remanufatura, programas de extensão da vida útil e o desenvolvimento de sistemas a partir da reutilização de componentes de um sistema existente. O manual também afirma que a modernização pode ser tratada de maneira semelhante ao desenvolvimento de novos sistemas, acrescentando as seguintes atividades:

1. *Benchmark* de novos requisitos.
2. Análise e alocação de funções baseadas nos novos requisitos.
3. Análise da real capacidade do sistema antes de sua modernização.
4. Identificação de fatores de riscos e de custos, com a consequente monitoração do risco.
5. Desenvolvimento e avaliação de alternativas de projeto.
6. Prototipagem e verificação da melhoria obtida pela modernização.

Continuando a discussão sobre a modernização de sistemas, o *Systems Engineering Fundamentals* (DAU, 2001) apresenta uma lista de pontos a serem observados, pois podem originar armadilhas para o projeto:

1. Minimização de impactos operacionais – fatores ligados à necessidade de utilização do produto pelo usuário podem ditar a disponibilidade de sistemas para serem modernizados.
2. Gestão de configuração e interfaces – a chave para uma modificação bem sucedida é a compreensão e controle de interfaces e relacionamentos.
3. Problemas de compatibilidade logística – modificações no produto repercutem na logística de manutenção e de peças de reposição.
4. Recursos disponíveis – modificações muitas vezes são vistas de forma simplista (alterando um sistema existente da mesma forma que se altera um desenho), entretanto devem ser cuidadosamente planejadas para a

estimação de recursos mínimos necessários e bem conduzidas para a mitigação e controle de riscos.

5. Fornecedores – sistemas antigos tendem a possuir poucos fornecedores que detém certo conhecimento sobre seu projeto e funcionalidades. Isto é especialmente problemático se o sistema original possui componentes que o responsável pela modernização não tem dados de referência. Nestes casos, há um processo de aprendizagem que deve ser trabalhado antes do esforço de modificação. Dependendo no sistema específico, este processo de aprendizagem pode ser um grande esforço. Esta questão deve ser considerada no início do processo de modificação, porque tem graves implicações de custo.

2.2 Reprojetos

2.2.1 Engenharia reversa para a reengenharia de um sistema

Para reengenheirar um produto dentro de um processo de recuperação e modernização, é necessário ter em mãos o projeto original e uma série de informações correlatas que possibilitem ao projetista tomar decisões sobre como será o produto renovado.

O modelo de evolução⁵ do produto de Otto e Wood (1994), apresentado na Figura 2.4, é uma proposta para a compreensão do projeto original e posterior proposta para inovação de um produto existente. O modelo está desenvolvido em três fases básicas: a engenharia reversa, modelagem/análise e reprojetos.

---

⁵ Por evolução do produto, segundo Otto e Wood (1994), entende-se criar um novo produto a partir de um existente, evoluindo suas características.

Figura 2.4 - Modelo de evolução do produto.

Fonte: Otto e Wood (1994).

A engenharia reversa compõe-se de processos de investigação e busca de dados além da técnica de desmontar o produto relacionando suas partes a um conjunto de funções. Com base nesse conjunto de funções e conhecendo-se também as restrições que o produto apresenta, pode-se chegar a uma ideia das especificações de engenharia que o projeto original apresenta. Analisar e modelar visam um maior entendimento sobre o produto e seu projeto, de forma a ser possível inová-lo. Otto e Wood (1994) apresentam três formas possíveis para a inovação do produto original: variando parâmetros (paramétrico), incorporando novas soluções

em subsistemas (adaptativo) e, por fim, a partir do conhecimento adquirido, desenvolver um produto totalmente novo (reprojeto original⁶).

Ainda segundo Otto e Wood (1994), é necessário ressaltar a importância da obtenção da lista de materiais (BOM - *Bill-Of-Materials*), a qual é obtida pelo processo de desmontagem do produto. A lista de materiais e o conjunto de vistas explodidas devem representar as sucessivas montagens. A partir da identificação de funções, a lista de materiais também deve incorporar essas informações de modo ser possível sua utilização dentro dos processos de análise e modelagem.

Tang et al. (2010) argumentam que, conceitualmente, a engenharia reversa trata principalmente da obtenção de dimensões, formas e propriedades de um objeto, o que não seria suficiente para a compreensão do projeto de um produto complexo. Os autores criticam tal visão, dizendo que tal prática não se trata de engenharia reversa, mas de uma “modelagem geométrica reversa”. Segundo eles, é necessário que a engenharia reversa obtenha um conhecimento sobre o produto, de forma a entender padrões de relações funcionais entre os seus componentes para identificar princípios norteadores das soluções adotadas pelo projetista.

A modelagem funcional de um produto é uma importante ferramenta presente em várias referências, como em Stone e Wood (2000), Tang et al (2010). Umeda; Tomiyama; Yoshikawa (1995) consideram “função” como uma ponte entre a intenção do projetista e o comportamento do artefato. Stone e Wood (2000), são apresentadas definições de fluxos e funções como forma de se construir uma descrição funcional verbo-objeto. Erden et al (2012) perfazem uma extensa revisão sobre modelagem funcional, concluindo que há duas vantagens básicas para essa abordagem: uma visão privilegiada de todo o sistema a partir de termos (funções), que são de fácil compreensão e a construção de um *framework* que pode ser trabalhado por computador.

---

⁶ É preciso cuidado para não confundir com a expressão “projeto original”, que neste caso se refere ao produto no qual se aplicou o modelo.

2.2.2 Matriz de Estrutura de Projeto - *Design Structure Matrix (DSM)*

Desenvolvida por Steward (1981), a DSM – abreviatura de *Design Structure Matrix* (matriz da estrutura de projeto), também sendo encontrada a forma *Dependency Structure Matrix* (matriz da estrutura das dependências, em tradução livre) – é um método de modelagem baseado numa matriz quadrada, cujos rótulos de linha e coluna representam partes ou componentes de um sistema e as interações entre eles são identificadas por meio de um simbolismo para as relações de dependência.

No modelo mais simples de DSM, como está ilustrado na Figura 2.5.A, os componentes de um sistema tomado como exemplo estão representados por letras (A até G), que rotulam colunas e linhas. Por convenção, ao se ler uma linha (F, por exemplo), as marcas “X” indicam que o componente que dá nome à linha tem influência do componente da coluna (No exemplo da linha F, o componente F influencia A, B e G). De modo análogo, a leitura de uma coluna indica por quais componentes o componente-rótulo é influenciado (No exemplo, a coluna B pode se ler como: “B é influenciado por A e F”).

Figura 2.5 - Diversos modelos de DSM.

Fonte: Adaptado de Eppinger e Browning (2012).

Outros modelos de representação da DSM podem ser encontrados na literatura - vide Eppinger e Browning (2012) - sendo possível a utilização de padrões

numéricos (Figura 2.5.B) ou de um simbolismo baseado em cores (Figura 2.4.C). A ideia destes modelos é incluir algum tipo de gradação da interação, de acordo com a convenção adotada.

É possível também representar vários tipos de interações entre componentes numa mesma DSM, como ilustrado na Figura 2.5.C. Neste sentido, Pimmler e Eppinger (1994) propõem a representação de quatro tipos importantes de interação na DSM do produto:

1. Física ou espacial: identifica necessidade de adjacência e/ou orientação entre dois componentes.
2. Energética: identifica transferências de energia entre componentes.
3. De material: identifica transferência de material entre componentes.
4. Informacional: identifica necessidade de informações ou troca de sinais entre componentes.

Browning (2001) contribui com uma extensa revisão bibliográfica sobre o uso da DSM, onde enfatiza a crescente popularidade do método. Sua tese de doutorado (BROWNING, 1998) emprega exaustivamente a DSM, enfatizando o seu caráter simples, porém altamente representativo e visual. Eppinger e Browning (2012) consolidam a teoria relacionada ao assunto, apresentando basicamente três tipos de DSM – produto, organização e processo – além de modelos compostos na forma de matrizes multidomínios (MDM – *Multidomain matrix*).

Em www.dsmweb.org (THE DESIGN STRUCTURE MATRIX, 2013), página da Comunidade DSM, pode-se encontrar amplo material sobre o tema, principalmente a relação de ferramentas (softwares) que empregam a DSM.

De forma geral, costuma-se representar um sistema ou produto por meio de uma decomposição em subsistemas ou partes menores. Referências clássicas de Engenharia de Sistemas apresentam várias formas de estruturar o produto – *vide* Blanchard e Fabrycky (2006), Kossiakoff et al. (2011), Defense Acquisition University (2001) e INCOSE (2006). Com a mesma finalidade, a DSM do produto procura representá-lo de forma estruturada, salientando as interações entre módulos e

componentes. Para o emprego da DSM do produto, Eppinger e Browning (2012) alertam para se tomar cuidado com os seguintes fatores:

1. Fronteiras – os limites do sistema modelado devem incluir todos os componentes relevantes e suas interações, sendo possível deixar elementos fora dessas fronteiras, para fins de simplificação da modelagem.
2. Tipos de interação – deve-se considerar que interações podem ser facilmente compreendidas ou não. Algumas interações podem ocorrer sob condições muito específicas (um bom exemplo é a propagação de uma falha a partir de um componente operando fora de suas características normais), outras podem estar ocultas.
3. Força de interação – quanto mais se considera o nível, força ou grau de interação entre componentes, mais completo torna-se o modelo.
4. Simetria – parte das interações presentes na DSM do produto é simétrica, ou seja, um componente A influencia B e vice versa. Entretanto, isto não é uma regra, pois o tipo de interação determinada pode gerar assimetrias.
5. Granularidade – em muitos sistemas, é importante equacionar o dilema entre um maior detalhamento do modelo contra sua simplificação em níveis suficientes para a facilidade na execução de análises.

São muito comuns ações e análises de agrupamento (*clustering*) de componentes, seja por motivos ligados à própria arquitetura (agrupar componentes de um sistema), seja por motivos ligados ao contexto de utilização da DSM – podem-se agrupar componentes por fornecedor comum, tipos de interações, práticas de manutenção, entre outros.

Sharman e Yassine (2004), dentro de um estudo comparativo com outros métodos de representação da arquitetura do produto, advogam a simplicidade do método DSM junto com a facilidade em se tornar um bom ponto de partida para gravação de dados (informatização). Entretanto, os autores alertam que a DSM pode

apresentar inconvenientes de sobrecarga computacional e de trabalho quando aplicados a sistemas grandes e/ou complexos⁷.

2.2.3 Análise de alterações de engenharia

A modernização do sistema em larga escala é um conjunto de alterações de engenharia ou modificações técnicas, termos usados no gerenciamento de configuração para descrever qualquer alteração de um produto ou de sua documentação técnica. Normas relativas às alterações de engenharia no produto têm um foco especial na avaliação do impacto dessas modificações no projeto e propõem a utilização de ferramentas de gestão de riscos para lidar melhor com isso, Department of Defense (2002) e ISO (2003).

Em Jarrat et al. (2011), dentro de um trabalho de revisão da literatura sobre o tema, são propostas diversas classificações para as alterações de engenharia. Quanto à razão para se desenvolver o processo de alteração, os autores classificam em:

1. Alterações emergentes – as que surgem das propriedades do produto em si, o que é exemplificado por erros que precisam ser corrigidos em questões de deficiências de projeto, segurança, problemas no desempenho de funções e má qualidade;
2. Alterações iniciadas – provocadas por um agente externo, como por exemplo, novos requisitos de clientes, novas tecnologias, alterações em regulamentações e legislações, entre outros.

Eckert et al. (2004) observaram que alterações num componente podem se propagar dentro do produto como um “efeito dominó”. Os autores argumentam que é

---

⁷ Cabe aqui uma breve consideração a respeito do termo “sistema complexo”. De acordo com o SEBoK (PYSTER et al, 2012), complexidade é uma medida de quão difícil é saber como um sistema se comportará ou quais seriam as suas consequências ante a uma mudança. Prosseguindo, a complexidade de um sistema ocorre quando não se tem uma relação simples entre um componente e o sistema como um todo. Esta obra não possui a pretensão de prolongar essa discussão, apenas admitindo as limitações da ferramenta DSM e incorporando-as nas próprias limitações do método proposto.

possível classificar um componente de acordo com o efeito de uma alteração e a tendência na propagação para os demais. São basicamente quatro classes:

1. Constantes – componentes não afetados, pois não absorvem nem provocam alterações;
2. Absorventes – absorvem mais alterações do que provocam, o que reduz a complexidade do problema de propagação. Toma-se, por exemplo, grandes componentes estruturais, como o monobloco de um veículo;
3. Carregadores – simplesmente transferem uma alteração de um componente para outro, caso de alterações de geometria;
4. Multiplicadores – geram mais alterações do que sofrem, como é o caso do motor de um veículo, cuja modificação pode influenciar o restante do trem de força, arrefecimento e sistema de frenagem.

Clarckson et al (2004) propõem um modelo para predição da propagação de alterações de engenharia utilizando o DSM como forma de se estabelecer relações entre componentes, de modo a poder obter o que os autores chamam de matriz de risco do produto, que é formada pela composição das probabilidades de um componente ser afetado, dado que outro foi alterado, com uma extensão de custos de engenharia para a efetuação dessas alterações. Este modelo serve de subsídio para flexibilizar o próprio produto, atuando como ferramenta de apoio às discussões com clientes para avaliação de custos de personalizações.

Pasqual e de Weck (2011) analisam a propagação de alterações dentro de uma abordagem em três camadas: a do produto em si, a das alterações e uma camada social (que representa a organização formada por engenheiros, equipes de projeto, etc). Dentro desse raciocínio, os autores analisam interações dentro de cada camada e entre camadas, de modo a propor um repositório de ferramentas e métricas.

2.3 Confiabilidade

A antiga norma americana MIL-STD-721C (1981), já descontinuada, define confiabilidade como sendo a probabilidade de um item executar a sua função (missão) sob condições pré-definidas de uso e manutenção por um período de

tempo específico. Para definir a confiabilidade de um item qualquer, é necessário especificar uma ou mais funções desempenhadas, além de se considerar condições de operação e tempo de utilização. Para as funções do item, também se deve especificar um desempenho desejado. Se este item deixar de cumprir pelo menos uma de suas funções requeridas ou se cumpre esta função com um desempenho inferior ao requerido, pode-se dizer que este item falhou.

Modarres (1993) afirma que o termo confiabilidade tem duas conotações. A primeira conotação, de cunho probabilístico, possui um tratamento matemático mais apurado. É uma análise quantitativa, sendo desenvolvida segundo modelos matemáticos que estão baseados em hipóteses que devem ser observadas na sua aplicação ao modelo real.

Outra visão de confiabilidade, que Modarres (1993) conceitua como determinística, está centrada na análise de como e por que um item vem a falhar. Neste importante ramo, surgem teorias sobre princípios físicos da ocorrência e da propagação de falhas, além de metodologias de análise e prevenção de falhas. É uma forma de análise qualitativa, fundamentada na interpretação do fenômeno, com resultados fortemente aplicáveis para o projeto, operação e manutenção do item analisado.

2.3.1 Conceitos matemáticos

A confiabilidade num dado instante é definida como a probabilidade de um elemento ou sistema operar sem falhas até este instante, ou que a falha ocorra em um tempo maior. A equação 2.1 apresenta esse conceito em notação matemática.

$$R(t) = P(T \geq t \mid c_1, c_2 \dots) \quad (2.1)$$

Onde:

$R(t)$ = confiabilidade

P = probabilidade

t = tempo

T = tempo para ocorrer uma falha

c_1, c_2 = condições de funcionamento, incluindo o ambiente de operação

Admitindo dois estados mutuamente excludentes, nos quais um elemento pode estar em relação à falha – falho ou não-falho – a não-confiabilidade, ou probabilidade de falha é definida pelas equações 2.2 e 2.3.

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (2.2)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.3)$$

Empiricamente, a confiabilidade é medida a partir da observação ou teste sobre uma determinada população em relação à quantidade de sobreviventes ou itens não falhados após um determinado tempo, (ASSIS, 2010), sendo expressa pela equação 2.4.

$$R(t) = \frac{\text{Quantidade de sobreviventes até } t}{\text{Quantidade inicial da população}} \quad (2.4)$$

A função $f(t)$ representa a função densidade de probabilidade, que descreve a distribuição de probabilidades de falha ao longo do tempo. A partir dela, pode-se calcular a não-confiabilidade e a confiabilidade pelas equações 2.5 e 2.6, respectivamente.

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(\theta) d\theta \quad (2.5)$$

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(\theta) d\theta \quad (2.6)$$

O valor esperado da distribuição de tempos até a falha possui um significado importante na disciplina de confiabilidade, sendo denominado de tempo médio até a falha. É muito comum o uso da sigla MTTF, referente à sua denominação em inglês (*Mean Time To Failure*). Calcula-se pela fórmula 2.7.

$$MTTF = E[f(t)] = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.7)$$

Outro parâmetro de importante para a confiabilidade é a taxa de falhas $h(t)$, definida pela probabilidade de um item falhar no próximo instante infinitesimal

$(t + \Delta t)$, dado que não falhou até o tempo t . A equação 2.8 apresenta esse conceito matematicamente.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)/dt}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.8)$$

A representação gráfica da curva da taxa de falhas em relação ao tempo é conhecida como curva da banheira, em razão a alguns de seus formatos característicos, como se pode observar na Figura 2.6. Em geral, podem-se distinguir três fases representativas da vida de um item.

Figura 2.6 - Curva da taxa de falhas (banheira).

Fonte: Lafraia (2001).

A primeira fase ou período de mortalidade infantil apresenta um decrescimento da curva de taxa de falhas. Este fenômeno ocorre devido ao comportamento probabilístico de certos tipos de falhas que se manifestam no início da operação do item. São falhas originárias de erros de projeto, fabricação, montagem e instalação. São conhecidas como falhas prematuras.

O segundo período, que apresenta uma taxa de falhas supostamente constante é, segundo Moubray (1997), denominado de período de vida útil, quando as possíveis falhas são decorrentes de causas aleatórias ou imprevisíveis. Finalmente, quando a curva da taxa de falhas passa a exibir um comportamento crescente, inicia-se uma fase denominada de período de desgaste quando ocorrem

com mais frequências as falhas decorrentes do envelhecimento e desgaste do componente.

A Figura 2.7 apresenta seis padrões diferentes para a curva de taxa de falhas. O padrão A (o mesmo que é representado na Figura 2.6) é conhecido por “padrão clássico”, sendo uma combinação de dois ou mais padrões de curva de taxa de falhas, sendo mais comum em equipamentos elétricos (MOUBRAY, 1997).

O padrão B está associado a itens que apresentam falhas dependentes do tempo, ou seja, falhas resultantes de um processo aproximadamente linear de degradação. Tomam-se por exemplo itens submetidos à abrasão, cuja falha acontece ao se atingir determinada medida de desgaste. Verifica-se na geometria da curva que existe um período de vida útil, representado pela parte aproximadamente horizontal, sendo seguida por um período de crescente taxa de falhas.

O padrão C difere do anterior por não apresentar um ponto distinto, a partir do qual pode-se afirmar que o desgaste se inicia, (MOUBRAY, 1997).

O padrão D significa que o item possui probabilidade de falhas associada a uma distribuição Weibull cujo parâmetro de forma está entre um e dois⁸.

O padrão E está associado a falhas aleatórias, quando a probabilidade de falha do item dentro de um período de tempo é a mesma em qualquer outro período.

O padrão F é caracterizado por apresentar um comportamento no qual a probabilidade de falhas decresce com o tempo. A curva apresenta uma fase considerável de mortalidade infantil (valores elevados de taxa de falha). Segundo Moubray (1997), é o mais comum dos seis padrões, apresentando uma constância da taxa de falhas devido à ação de uma manutenção eficiente, que não permite que o componente ingresse no período de desgaste.

---

⁸ Ver a seção 2.3.3.1.

Figura 2.7 – Seis padrões de curvas da taxa de falhas.

Fonte: Moubray (1997).

2.3.2 Ferramentas de confiabilidade empregadas nesta tese

A engenharia de confiabilidade dispõe de uma ampla gama de métodos e ferramentas, cuja exposição neste texto seria extensa. Neste sentido, a presente seção limita-se à discussão de duas ferramentas usadas na metodologia proposta por esta tese. Tais métodos foram selecionados pela sua adequação ao próprio método e também por serem bastante difundidos.

2.3.2.1 Análise de modos, efeitos e criticidade de falha

A análise de modos, efeitos e criticidade de falha, também conhecida pelo acrônimo FMECA (do inglês *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*), é uma técnica de confiabilidade que examina potenciais modos de falha de modo a

determinar os efeitos no equipamento e no desempenho do sistema, (RIAC, 1993). É um método estruturado, que se baseia na análise de cada componente ou parte do sistema, observando as suas funções e analisando possíveis estados de falhas, com suas causas e efeitos. É um método de análise do tipo *bottom-up*, pois começa com o menor nível na hierarquia do sistema (isto é, o item), e pelo conhecimento dos modos de falha de cada parte, pretende conjecturar o efeito destas falhas no sistema como um todo. Segundo o MIL-HDBK-338B, (DOD, 1998), uma boa análise FMECA pode proporcionar:

1. Um método para seleção de projeto com uma grande probabilidade de sucesso operacional e segurança;
2. Um método padronizado e documentado de estudo dos modos de falhas e de seus possíveis efeitos no sistema;
3. Previsão de possíveis problemas nas interfaces de sistemas;
4. Uma listagem das possíveis falhas, o que permite classificá-las em categorias de acordo com seus efeitos e a probabilidade de ocorrência;
5. Identificação de pontos críticos para ocorrência de falhas;
6. Critérios para o planejamento de testes para assegurar a confiabilidade;
7. Dados de entrada para a predição de confiabilidade e modelos de segurança;
8. Uma base para o projetista alocar sistemas de monitoramento de operação ou detecção de falhas ou redundâncias;
9. Uma ferramenta de auxílio na avaliação de alterações nas configurações de projeto e operação.

Segundo a norma MIL-STD-1629, (DOD, 1980), o FMECA é composto por duas análises separadas: o FMEA (Análise de modos e efeitos de falha) e a análise de criticidade (CA, de *Criticality Analysis*).

2.3.2.1.1 FMEA: Análise de modos e efeitos de falha

Na literatura, encontram-se vários procedimentos para a confecção do FMEA, sendo comuns variações segundo o contexto de aplicação ou áreas específicas

como a automobilística ou a aeroespacial, vide Kececioglu (2002), Levenson (1995), Ireson et al (1995). A norma MIL-STD-1629 (DOD, 1980) apresenta como referência um conjunto de oito passos para a confecção do FMEA:

1. Definir o sistema a ser analisado – incluindo a identificação das funções internas e das funções das interfaces do sistema, o desempenho esperado, e a definição das falhas;
2. Construir diagramas de blocos para esquematizar as relações entre os componentes do sistema;
3. Identificar todos os modos de falhas potenciais de cada item e de cada interface;
4. Avaliar cada modo potencial de falha em termos da pior consequência possível de forma a classificar a sua severidade;
5. Identificar métodos de detecção de falhas;
6. Identificar ações corretivas de projetos ou outras ações necessárias para eliminar a falha ou controlar o risco;
7. Identificar os efeitos de ações corretivas;
8. Documentar a análise, destacando os problemas que não podem ser corrigidos por modificações de projeto e identificar os controles especiais necessários para reduzir o risco da falha.

Apesar de não existir uma formatação rigidamente padronizada para a sua esquematização, o FMEA é apresentado sob a forma de uma tabela, como exemplificado pela Figura 2.8.A, que foi extraída da norma MIL-STD-1629. As primeiras colunas são destinadas à identificação do componente. A seguir, as funções desempenhadas por este componente são identificadas na terceira coluna. Todas as falhas previsíveis devem ser identificadas e analisadas. Os prováveis modos de falha devem ser obtidos por meio do exame das relações funcionais do componente e, se um modo de falha possuir mais de uma causa, todas as possíveis causas independentes também devem ser analisadas separadamente.

Para assegurar uma análise mais completa, a norma MIL-STD-1629 apresenta a seguinte listagem de condições de falha:

1. Operação prematura – o item funciona antes do previsto;
2. Falha em operar em um tempo prescrito – o item não opera durante o tempo especificado;
3. Operação intermitente – intercalam-se períodos de funcionamento com períodos de falha;
4. Falha em cessar a operação em um tempo prescrito – o item não desliga quando especificado;
5. Perda de desempenho ou falha durante a operação;
6. Degradação do desempenho ou da capacidade – ao longo do tempo, a máquina sofre degradação da sua capacidade;
7. Outras condições particulares ao sistema analisado.

Os efeitos da falha são analisados nos diversos níveis. O efeito local é constituído especificamente no impacto da falha na operação e funcionamento do próprio componente. Também são observados os efeitos da falha em um próximo nível e seu efeito final, ou seja nos seus possíveis desdobramentos.

Figura 2.8 - Modelos de FMEA e FMECA.

A) ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA														
NÚMERO IDENTIFICAÇÃO	ITEM	FUNÇÃO	MODOS E CAUSAS DE FALHA	FASE DA MISSÃO/ MODO DE OPERAÇÃO	EFEITOS DA FALHA			MÉTODO DE DETECÇÃO DA FALHA	MEDIDAS COMPENSATÓRIAS (PROJETO) (OPERAÇÃO)	SEVERIDADE	OBSERVAÇÕES			
					LOCAL	PRÓXIMO NÍVEL	FINAL							
B) ANÁLISE DE MODOS, EFEITOS E CRITICIDADE DE FALHA														
NÚMERO IDENTIFICAÇÃO	ITEM	FUNÇÃO	MODOS E CAUSAS DE FALHA	FASE DA MISSÃO/ MODO DE OPERAÇÃO	SEVERIDADE	PROBABILIDADE DE FALHA		β^*	α_m^*	λ_p^*	t^*	$C_m = \beta . \alpha_m . \lambda_p . t^*$	$C = \sum_{i=1}^h C_m^*$	OBS.
						TAXA DE FALHAS								
* - A definição destes termos está descrita no texto														

Fonte: adaptado de Department of Defense (1980).

2.3.2.1.2 Análise de criticidade

A análise de criticidade pode ter uma abordagem qualitativa ou quantitativa, o que depende da disponibilidade de dados e do conhecimento sobre a configuração de componentes, (RIAC, 1993). A Figura 2.8.B ilustra o FMECA com os campos da análise de criticidade.

Nos moldes da MIL-STD-1629, a análise quantitativa é baseada no cálculo do valor da criticidade de um modo de falha (C_m), obtido pela equação 2.9.

$$C_m = \beta \cdot \alpha \cdot \lambda_p \cdot t \quad (2.9)$$

Onde:

β = probabilidade condicional de perda da missão

α = proporção de modo de falha

λ_p = taxa de falhas do componente (falhas por milhão de horas de operação)

t = duração da missão expressa em horas ou número de ciclos.

Pede-se ao leitor a consulta à MIL-STD-1629 para uma melhor explanação dos termos da equação acima. O documento *Failure Mode/Mechanism Distribution (FMD-91)*, (RIAC, 1991), da instituição *Reliability Information Analysis Center (RIAC)* é uma compilação de valores distribuídos para a proporção de falhas de vários componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos. O documento constitui uma fonte de informação sobre modos de falha mesmo para análises mais simples, sem o cálculo da criticidade.

Uma alternativa para a análise de criticidade do FMECA é utilizar o chamado Número de Prioridade de Risco (NPR), (DOD, 1998). Esta estimativa é baseada em três índices de análise: severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D), sendo obtida pela relação expressa na equação 2.10.

$$NPR = S \times O \times D \quad (2.10)$$

O índice de severidade (S) reflete as consequências do efeito de uma falha. Uma consequência catastrófica como a morte de alguém receberia um valor máximo, por exemplo. Na verdade, tanto a severidade quanto os demais índices são tabelados segundo um julgamento aproximado, sendo comum uma variação de seu

valor entre o grau mínimo 1 e o grau máximo 10. Como exemplo, a Tabela 2.1 apresenta valores para a severidade aplicada ao FMEA de componentes eletrônicos de aplicação militar extraídos da MIL-HDBK-338, (DOD, 1998).

O índice de ocorrência (O) está relacionado com uma estimativa da probabilidade de ocorrência de uma causa de falha. Este índice é mais uma medida relativa do que uma probabilidade. Seu valor também varia entre 1 e 10, como se pode observar na Tabela 2.2, também extraída da MIL-HDBK-338.

O índice de detecção (D), vide Tabela 2.3, é uma aproximação da probabilidade do controle atual deixar de impedir a ocorrência da falha. Uma função devidamente monitorada, com um modo de falha que exhibe sinais prematuros indicativos de seu desenvolvimento, como uma alteração em variáveis de controle, receberia um valor menor do que um modo de falha que não pudesse ser monitorado a tempo de permitir uma ação de contenção antes da ocorrência da falha.

Tabela 2.1 - Índice de severidade.

EFEITO	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO	VALOR
Perigoso – sem aviso	Um modo de falha potencial afeta a segurança da operação do veículo e/ou envolve o não cumprimento de regulamentação governamental. Ocorrência sem aviso prévio.	10
Perigoso – com aviso	Um modo de falha potencial afeta a segurança da operação do veículo e/ou envolve o não cumprimento de regulamentação governamental. Ocorrência com aviso prévio.	9
Muito elevado	Inoperância do veículo ou do item. Perda da função primária.	8
Elevado	Inoperância do veículo ou do item. Redução do desempenho da função primária. Insatisfação do cliente.	7
Moderado	Veículo ainda opera, porém há inoperância de itens de conforto ou conveniência. O cliente experimenta um desconforto.	6
Baixo	Veículo ainda opera, porém alguns itens de conforto ou conveniência operam insatisfatoriamente. O cliente experimenta uma sensação de insatisfação.	5
Muito baixo	Item apresenta não-conformidade de acabamento ou aparecimento de ruídos.	4
Mínimo	Item apresenta não-conformidade de acabamento ou aparecimento de ruídos.	3
Abaixo do mínimo	Item apresenta não-conformidade de acabamento ou aparecimento de ruídos. Defeito pode ser notado por um cliente muito crítico.	2
Nenhum	Nenhum efeito	1

Fonte: Department of Defense (1998)

Tabela 2.2 - Índice de ocorrência. Fonte: DoD (1998).

PROBABILIDADE DE FALHA	PROVÁVEIS TAXAS DE FALHAS	VALOR
Muito elevada: a falha é inevitável.	≥ 1 em 2	10
	1 em 3	9
Elevada: falhas recorrentes.	1 em 8	8
	1 em 20	7
Moderada: falhas ocasionais.	1 em 80	6
	1 em 400	5
	1 em 2.000	4
Baixa: relativamente poucas falhas.	1 em 15.000	3
	1 em 150.000	2
Remota: a falha é improvável.	1 em 1.500.000	1

Fonte: Department of Defense (1998)

Tabela 2.3 - Índice de detecção.

DETECÇÃO	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO	VALOR
Absolutamente incerta	O controle projetado não irá ou não poderá detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha; ou não há controle projetado.	10
Muito remota	Chance muito remota de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	9
Remota	Chance remota de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	8
Muito pequena	Chance muito pequena de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	7
Pequena	Pequena chance de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	6
Moderada	Chance moderada de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	5
Moderadamente alta	Chance moderadamente alta de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	4
Elevada	Chance elevada de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	3
Muito elevada	Chance muito elevada de que o controle projetado possa detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	2
Quase certa	O controle projetado certamente irá detectar potencial causa ou mecanismo e seu consequente modo de falha.	1

Fonte: Department of Defense (1998)

2.3.2.2 HAZOP – Análise crítica de processo

O método conhecido por HAZOP (*Hazard and Operability Studies*) ou ACP (Análise Crítica de Processo) foi desenvolvido durante a década de 60 pela empresa ICI com o propósito de identificar perigos em um processo, (KLETZ, 1997) O HAZOP possui uma abordagem sistemática, a fim de entender e estabelecer possíveis consequências de desvios das condições normais de projeto e de parâmetros de

desempenho. Segundo Montague (1990), o HAZOP pode focalizar em uma área ou operação vários tipos de riscos, provendo uma medida qualitativa dos mesmos, de uma forma bem estruturada. Evidente a grande aplicação do HAZOP na indústria química, dada a sua origem e a sua forma de atuação em processos contínuos, porém Kletz (1997) aponta outras aplicações para a técnica, uma delas, a aplicação em processos mecânicos.

Fundamentalmente, o HAZOP é uma técnica estruturada que foi desenvolvida para identificar riscos de uma instalação industrial, mas que procura, principalmente, identificar problemas referentes aos procedimentos operacionais que possam levar a danos materiais e/ou humanos. Desta forma, o HAZOP não é uma determinação de falhas por excelência, mas uma avaliação não quantificada dos riscos e dos problemas operacionais presentes em um processo industrial. Para o emprego satisfatório do HAZOP, exige-se uma completa descrição do projeto (desenhos de engenharia atualizados, documentação completa) e um sólido conhecimento sobre o funcionamento do sistema.

O processo de execução de um estudo de HAZOP é estruturado e sistemático. Portanto, faz-se necessário o entendimento de alguns termos específicos que são utilizados no desenvolvimento de uma análise de risco desta natureza:

1. Nós-de-estudo (*Study Nodes*): são os pontos do processo que serão analisados nos casos em que ocorram desvios;
2. Intenção de operação: a intenção de operação define os parâmetros de funcionamento normal, na ausência de desvios, nos nós-de-estudo;
3. Desvios: os desvios são afastamentos das intenções de operação, que são evidenciados pela aplicação sistemática das palavras-guia aos nós-de-estudo (p. ex., mais pressão), ou seja, são distúrbios provocados no equilíbrio do sistema;
4. Causas: são os motivos pelos quais os desvios ocorrem. As causas dos desvios podem advir de falhas do sistema, erro humano, um estado de operação do processo não previsto (p. ex., mudança de composição de um

gás), distúrbios externos (p. ex., perda de potência devido à queda de energia elétrica), etc.;

5. Consequências: as consequências são os resultados decorrentes de um desvio da intenção de operação em um determinado nó-de-estudo (p. ex., liberação de material tóxico para o ambiente de trabalho);
6. Parâmetros de processo: são os fatores ou componentes da intenção de operação, ou seja, são as variáveis físicas do processo (p. ex., vazão, pressão, temperatura) e os procedimentos operacionais (p. ex., operação, transferência);
7. Palavras-guia ou Palavras-chave (*Guidewords*): são palavras simples utilizadas para qualificar os desvios da intenção de operação. As palavras-guia são aplicadas aos parâmetros de processo que permanecem dentro dos padrões estabelecidos pela intenção de operação.

Para execução do estudo, a técnica de HAZOP requer, primeiramente, uma divisão em nós-de-estudo e, posteriormente, a análise do processo, nestes pontos, com o uso das palavras-guia. A metodologia consiste em aplicar todas as palavras-guia a cada parâmetro de processo do nó-de-estudo escolhido, gerando desvios da intenção de operação. Estes desvios devem ser analisados em suas causas e consequências, e medidas devem ser sugeridas para eliminação ou mitigação das mesmas. Após terem sido respondidas todas as questões resultantes dos desvios gerados, a equipe move-se para o próximo nó-de-estudo e torna a aplicar as palavras-guia aos parâmetros de processo, e assim por diante. A técnica HAZOP é geralmente utilizada com o emprego de tabelas, como o exemplo apresentado na Tabela 2.4.

Para cada desvio, é oportuno associá-lo a uma ou mais causas. Por exemplo, um excesso de profundidade (MAIOR profundidade) em uma operação de furação executado por um centro de usinagem de controle numérico pode estar associado a um erro de programação ou a uma posição incorreta da ferramenta. Cada desvio também está associado às suas possíveis consequências, que precisam ser discriminadas na análise. Aproveitando o exemplo anterior, o desvio “MAIOR profundidade” pode causar desde o refugo da peça até a quebra da ferramenta ou da própria mesa da máquina.

Tabela 2.4 - Exemplo de HAZOP.

Nr	Nó de estudo	Palavra-guia	Desvio	Causas possíveis	Consequências possíveis	Barreiras existentes	Risco			Melhorias propostas
							O	S	N P R	
1	Fluxo	não	Não (tem) fluxo	torneira fechada	sem água no balde	não existe.	1	1	1	nenhuma
2		maior	fluxo maior	torneira muito aberta	balde enche muito rápido. Possibilidade de transbordamento.	inspeção visual.	2	2	4	maior atenção durante o enchimento do balde.
3		menor	fluxo menor	torneira não foi aberta suficientemente	balde enche muito devagar. Possibilidade de atraso.	inspeção visual.	3	1	3	

Legenda: O: Ocorrência
S: Severidade
NPR: Número de Prioridade de Risco

Fonte: adaptado de Rausand (2011).

2.3.3 Obtenção da confiabilidade de componentes a partir de um histórico de consumo

A confiabilidade de um componente pode ser determinada por meio de ensaios próprios, que demandam estrutura, procedimento, tempos e custos. Nem sempre é razoável executar um ensaio de confiabilidade, sendo necessário buscar a informação por outros meios. Uma forma de obtenção de dados de confiabilidade é o exame de bancos de dados, como o NPRD-2011 (*Nonelectronic Parts Reliability Data* – Dados de componentes não eletrônicos) (MAHAR, 2011), publicado pelo *Reliability Information Analysis Center*, que contém dados de mais de 25.000 itens. São dados coletados entre o início da década de 70 até meados de 2008, o que confere um grande volume de informação. O próprio documento adverte para algumas limitações em relação a erros e imprecisão dos dados:

1. Na consideração de fatores que influenciam a confiabilidade de cada item, alguns fatores foram desprezados.
2. Existe um grau de incerteza nos dados sobre taxa de falha decorrente de:
  - a. Incerteza se a falha detalhada é um caso comum ou excepcional;
  - b. Dificuldade na separação entre falhas primárias e falhas secundárias (causadas por outras);
  - c. Existência de informações muito genéricas, sem especificação de fabricantes e de possíveis variações no processo de fabricação dos componentes.

3. É difícil distinguir os efeitos de variáveis correlacionadas. Por exemplo, o típico uso de componentes de alta qualidade em ambientes mais nocivos torna impossível determinar e distinguir em termos de confiabilidade os efeitos da qualidade e do ambiente.
4. As horas de operação relatadas para a pesquisa de informações podem estar incorretas.
5. É possível que os registros de manutenção não tenham sido elaborados corretamente.
6. As solicitações reais raramente são conhecidas, sendo utilizadas as tensões nominais.
7. Não há o acompanhamento de um “equipamento” específico ao longo de toda a vida. Mistura-se a estatística de falha de vários equipamentos.

O NPRD-2011 apresenta os seguintes dados: descrição sumária do componente (tipo, fabricante, uso), população analisada do componente, quantidade de falhas e tempo de utilização. Para o cálculo da confiabilidade, admite-se como premissa uma distribuição de Weibull das falhas dos componentes.

2.3.3.1 Distribuição de Weibull

Dentre as distribuições usadas para confiabilidade, a distribuição de Weibull tem uma ampla gama de aplicações devido à sua propriedade de cobrir uma grande variedade de formatos. Ela é caracterizada por três parâmetros:

- α , que é o parâmetro de escala, que define o espalhamento da distribuição ao longo do eixo das abscissas.
- β , que é o parâmetro de forma, ou seja, define o formato da distribuição, podendo cobrir as três fases da curva da banheira, da seguinte forma:
  - Valores de $\beta < 1$: possui taxa de falhas decrescente – típico de itens com mortalidade infantil.
  - Valores de $\beta = 1$: a distribuição reduz-se à distribuição exponencial, possuindo taxa de falhas constante.

- Valores de $\beta > 1$: possui taxa de falhas crescente – típico de itens que se desgastam. Merecem destaque:
  - $\beta = 2$: assemelha-se à distribuição log-normal.
  - $\beta = 3,5$: assemelha-se à distribuição normal.
- γ , que é o parâmetro de localização, que corresponde ao menor valor assumido por t , criando uma espécie de tempo sem falhas para valores de $\gamma > 0$ e uma “vida de prateleira” (componente pode falhar antes de ser usado), para $\gamma < 0$, (LAFRAIA, 2001).

As principais formulações matemáticas da distribuição de Weibull para a confiabilidade são colocadas nas equações 2.11 a 2.15.

$$f(t) = \frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.11)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.12)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.13)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.14)$$

$$MTTF = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right) \quad (2.15)$$

Quando não há razão para o uso do parâmetro de localização, utiliza-se a distribuição de Weibull com dois parâmetros, fazendo $\gamma = 0$.

2.3.3.2 Metodologia de cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull

Para se obter a confiabilidade de um componente a partir do NPRD-2011 ou de outra base de dados semelhante, de acordo com a distribuição de Weibull, é necessário empregar uma metodologia que está centrada na Tabela 2.5, que apresenta valores de porcentagens cumulativas de falha como uma função do

parâmetro de forma e da razão entre tempo médio de operação de um componente (t) e o parâmetro de escala (também chamado de vida característica no NPRD-2011).

Tabela 2.5 - Percentuais de falhas para a distribuição de Weibull.

t/η	β					
	1	2	3	4	5	6
0,1	10	4,1	1,3	0,2	0	0
0,2	20	8,6	3,0	1,0	0,2	0
0,3	30	15	6,8	3,1	1,0	0,7
0,4	40	23	13	8,1	3,7	1,7
0,5	50	31	20	13	8,3	5,0
0,6	60	41	31	21	15	12
0,7	70	52	42	32	27	26
0,8	80	62	55	47	29	42
0,9	90	75	68	64	47	64
1,0	100	88	82	80	65	85
1,1	110	99	96	93	79	98
1,2	120	109	107	105	87	103
1,3	130	121	117	111	92	106
1,4	140	133	128	119	97	111
1,5	150	145	139	126	105	119
1,6	160	155	149	136	116	129
1,7	170	169	160	148	130	144
1,8	180	180	171	161	145	161
1,9	190	190	192	175	159	176
2,0	200	202	195	189	171	191
>2,0						

Fonte: (MAHAR, 2011).

De acordo com o NPRD-2011 (MAHAR, 2011), a vida característica de um componente é calculada da seguinte forma:

1. Determina-se o percentual de falhas, dividindo o número de falhas apresentadas pelo tamanho da população. Este percentual pode ser maior do que 100%, uma vez que os dados consideram a reposição dos componentes falhados.

2. Deve-se utilizar um valor para o parâmetro de forma (β), obtido a partir de outra referência.
3. Empregando a Tabela 2.5, a partir do percentual de falhas calculado e do parâmetro de forma (β) adotado, encontra-se o valor da razão t/η .
4. O parâmetro de escala (η) ou vida característica do componente é obtido a partir da razão t/η . O NPRD-2011 fornece o total de horas, milhas ou ciclos da população. Assim, o valor do tempo t é obtido dividindo-se este dado pelo tamanho da população.

2.4 Gestão de Riscos

Em termos gerais, a ideia de risco está associada à presença de uma fonte potencial de ameaça ou perigo. Entretanto, a existência do perigo por si só não é suficiente para definir uma condição de risco. É necessário que haja uma incerteza sobre a atualização desse potencial, uma possibilidade de que haja um resultado não desejado com algum tipo de consequência. Zio (2007) sintetiza este pensamento ao argumentar que a noção de risco envolve algum tipo de perda ou dano que possa ser recebida e a incerteza da sua transformação em uma perda real ou dano.

2.4.1 Conceitos gerais e definição de risco

A definição de risco como probabilidade de ocorrência de um determinado resultado multiplicado por sua consequência está presente nas obras de vários autores, como em Zio (2007), Woodhouse (1993) e Modarres (1993). Este item apresenta a fórmula dada pela equação 2.16, onde um valor esperado de risco (R) é calculado pelo somatório das multiplicações de todos os resultados possíveis associados à ocorrência de um evento inicial (P_i) pelas suas consequências (C_i):

$$R = \sum_i P_i \times C_i \quad (2.16)$$

Uma definição formal de risco é apresentada por Kumamoto e Henley (1996) como uma combinação de cinco primitivas: resultados (ou consequências), probabilidade, significância, cenário causal e população afetada. De certa forma, os

autores acrescentam à fórmula 2.16 as considerações circunstanciais que normalmente estão presentes dentro de análises de risco.

2.4.2 Análise de riscos

Paté-Cornell (2002) argumenta que a análise de risco em engenharia é executada por dois motivos: para demonstrar que um sistema é suficientemente seguro ou para estabelecer prioridades em termos de gerenciamento de riscos, identificando pontos fracos e otimizando a alocação de recursos.

No desenvolvimento de um modelo de gestão de riscos em projetos, Smith (2011) argumenta que o processo de análise de riscos deve possuir preferencialmente as seguintes características:

1. Ser baseado em cenários, contendo modelos que descrevem o funcionamento de um sistema e, de certa forma, examinem suas respostas.
2. Ser integrado, ou seja, que considere o todo formado pela associação de efeitos de vários itens de risco, com suas dependências e interfaces com outros modelos. Um *framework* sistemático e integrado permite avaliações de *tradeoff* e análises de sensibilidade entre vários tipos de risco e os elementos do sistema.
3. Ser quantitativo, baseado em números ou quantidades que representem o risco e auxiliem a decisão por meio de modelos matemáticos.
4. Possuir um caráter multi-atributo. Na realidade, decisores precisam lidar com múltiplos aspectos das consequências de uma decisão. Eles raramente tomam decisões baseados apenas em valores de riscos, mas integram-nos à sua visão de mundo.
5. Empregar probabilidades. Um modelo envolve suposições, simplificações, e variabilidade dos dados. É essencial que os decisores recebam informações sobre todos os três sob a forma de incertezas.
6. Ser acionável. O escopo do *framework* e seu nível de detalhamento têm de estar compatíveis com as habilidades de ação dos decisores.

7. Ter caráter probatório. Ser capaz de ordenar riscos e realizar análises de sensibilidade possibilita avaliar situações correntes e alternativas futuras dentro do modelo em questão.

Markeset e Kumar (2003) descrevem a aplicação de RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Supportability* - confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e suportabilidade) e análise de risco no contexto do projeto e desenvolvimento do produto (projeto propriamente dito, fabricação, fornecimento, comissionamento e suporte pós-venda). Salientando a importância da gestão de banco de dados e comunicação entre as partes interessadas, os autores sugerem um modelo de processo de desenvolvimento de produto, que enfatiza a importância da integração de componentes RAMS.

2.4.3 Gestão de riscos em engenharia de sistemas

Em geral, referências clássicas e manuais de engenharia de sistemas reservam um capítulo ou seção para a gestão de riscos, associando tal prática dentro do rol de técnicas gerenciais para o projeto e desenvolvimento de sistemas. Essa tratativa guarda muita semelhança com a gestão de riscos em projetos, como a proposta pelo PMBOK (PMI, 2008) e estudada por Chapman & Ward (2003). Reconhecendo que vários projetos são desenvolvidos em ambientes de incerteza, o manual do INCOSE (2006) apresenta a gestão de riscos como uma das atividades fundamentais do processo de engenharia de sistemas. Também apresenta uma classificação de categorias de riscos presentes em tais projetos, que também é adotada por Blanchard e Fabrycky (2006):

1. Riscos técnicos, que são associados à possibilidade de que o sistema não cumpra ou deixe de cumprir requisitos técnicos durante o seu ciclo de vida.
2. Riscos de custo, associados à possibilidade de se exceder o orçamento previsto.
3. Riscos de cronograma, associados à possibilidade de o projeto não cumprir prazos determinados.
4. Riscos programáticos, que são devidos a fatores que estão fora da competência e controle da gestão do projeto. Em geral, são decorrentes de

decisões de níveis hierárquicos superiores. Um exemplo bastante comum está na condução de projetos na Administração Pública, influenciados por políticas orçamentárias (corte, contingenciamento de recursos, entre outros).

A Figura 2.9, extraída do manual do INCOSE (2006) apresenta um quadro das principais interações entre as categorias de risco normalmente presentes no desenvolvimento de um projeto em engenharia de sistemas.

Figura 2.9 - Interação entre tipos de riscos na engenharia de sistemas.

Fonte: INCOSE (2006).

Smith (2011) desenvolveu uma pesquisa sobre a interação dos tipos de riscos, propondo na Figura 2.10 um quadro interativo que analisa separadamente os riscos associados ao projeto de desenvolvimento do sistema e os riscos do próprio sistema a ser realizado (produto final). De acordo com o autor, o gerenciamento de cada tipo de riscos (custos, cronograma, técnico) acaba provocando pressões nos demais, o que resulta em um estado de tensão que precisa ser corretamente gerenciado. Assim, as soluções para um correto gerenciamento de riscos dependem de um bom balanceamento dos tipos de riscos entre si e destes com os requisitos do sistema.

Blanchard e Fabrycky (2006) descrevem a gestão de riscos como um processo iterativo que abrange cinco passos: planejamento – identificação –

avaliação – análise – tratamento. Apesar de haver algumas variações na nomenclatura e na quantidade de etapas, esse processo é semelhante ao que propõe o INCOSE (2006) (identificação – avaliação – tratamento e controle – mitigação) e/ou o PMBOK (PMI, 2008) (planejamento – identificação – análise qualitativa – análise quantitativa – planejamento de respostas (tratamento) – monitoramento).

Figura 2.10 - Quadro de interações de riscos em projeto.

Fonte: Smith (2011).

Em 2011, a NASA publicou o manual *NASA/SP-2011-3422 NASA Risk Management Handbook*, (NASA, 2011) que consolida sua metodologia de gestão baseada em risco. Em linhas gerais, o seu processo de gestão é formado pela tomada de decisão baseada em risco⁹ e pelo gerenciamento contínuo de risco. A decisão baseada em risco é dividida em três partes:

⁹ Na verdade, a NASA emprega o termo *Risk-Informed Decision Making*, ou, em tradução livre, "tomada de decisão por risco informado", terminologia que não será empregada neste texto.

1. Identificação de alternativas. Entender as expectativas dos *stakeholders* e compilar alternativas viáveis.
2. Análise de risco das alternativas. Elaborar um *framework* de análise e escolher a melhor metodologia. Executar a análise de riscos e documentar.
3. Seleção da alternativa. A partir dos resultados do passo anterior, proceder à seleção e documentar a decisão.

O gerenciamento contínuo de risco é desenvolvido como consequência da própria tomada de decisão e preza o acompanhamento constante e presente ao longo do ciclo de vida do material, de modo a garantir que requisitos de segurança, técnicos, de custo e de cronograma sejam atendidos. Basicamente, é composto por um processo cíclico composto de:

1. Identificar. Com o propósito de capturar preocupações dos *stakeholders* em relação ao cumprimento de requisitos (preocupações relacionadas a riscos e cenários indesejáveis).
2. Analisar. Objetiva quantificar e classificar riscos, atualizar informações e determinar quais seriam os principais fatores que contribuem para o quadro de riscos.
3. Planejar. Decidir que ação deve ser tomada entre:
  - a. Aceitar – um determinado valor de risco pode ser aceito se estiver dentro do tolerado;
  - b. Mitigar – tentativas de reduzir o risco até níveis tolerados;
  - c. Observar – fatores que contribuem para o risco podem demandar melhor acompanhamento, incluindo ações de contingenciamento;
  - d. Pesquisar – pode ser necessária uma melhor compreensão dos fatores para a redução de suas incertezas;
  - e. Elevar – procedimento de conduzir toda a tratativa sobre determinado(s) risco(s) ao patrocinador do projeto ou escalão superior após a admissão de que tal problema extravasa a competência da gestão de riscos;

- f. Encerrar – determinado risco pode ser encerrado, ou seja, não mais tratado, quando se verificar que os seus fatores não mais contribuem de forma significativa.
- 4. Rastrear. Adquirir, compilar e informar dados para rastrear o progresso da implementação das decisões da gestão de riscos, bem como de sua eficácia. Observar também o surgimento de novos itens e eventuais mudanças nas análises procedidas.
- 5. Controlar. Assegurar que ações planejadas são efetivas e agir se preciso for.

2.4.4 Gestão de riscos na reengenharia de sistemas

Em relação a uma gestão de riscos associada à reengenharia do produto, Sage (2009) enfatiza que métodos tradicionais, normalmente propostos para o desenvolvimento de novos sistemas, podem ser empregados. Entretanto, ele cita a lista formulada por Arnold (1992), que identificou os seguintes tipos de riscos relacionados à reengenharia de produtos:

- 1. Riscos de integração, que estão associados com um produto reengenheirado que não pode ser satisfatoriamente integrado ou possuir interfaces com os demais sistemas existentes.
- 2. Riscos em relação à manutenção, que é o risco de que o produto reengenheirado vai piorar, em vez de melhorar, eventuais dificuldades de manutenção.
- 3. Riscos do sistema de gestão, quando se tem um produto reengenheirado que impõe determinada solução onde as maiores dificuldades estavam, na verdade, associadas ao sistema de gestão, podendo ser resolvidos nesse âmbito.
- 4. Riscos de processo, quando se tem um produto reengenheirado que impõe determinada solução onde as maiores dificuldades estavam, na verdade, associadas a processos da organização, podendo ser resolvidos nesse âmbito.
- 5. Riscos de cronograma, que estão associados a atrasos.

6. Riscos de aceitação, que estão associados com a obtenção de um produto reengenheirado que não é adequado para interação humana, ou um que é inaceitável para a organização do utilizador por outras razões.
7. Riscos de aplicação, que estão associados a ter um produto reengenheirado que realmente não satisfaz a aplicação ou propósito pretendidos.
8. Riscos associados a ferramentas e disponibilidade de métodos, quando os trabalhos de reengenharia dependem de métodos e técnicas que ainda não foram dominados pelos seus executantes.
9. Riscos associados à estratégia, liderança e cultura organizacionais, quando uma solução do produto reengenheirado não puder ser aceita pelo ambiente de sua organização proprietária.

2.4.5 ABNT ISO 31.000

De acordo com Purdy (2010), apesar das várias formas de gestão de riscos terem um objetivo comum – fornecer uma base sólida para decidir se os riscos analisados são aceitáveis e, se necessário, obter informações seguras sobre como eles podem ser tratados – há muitas definições diferentes para risco e numerosos processos para a sua gestão. Isso motivou a ISO (*International Organization for Standardization*) a estabelecer em norma um padrão aceitável para todas as formas de risco, baseando-se em:

1. Vocabulário único.
2. Um conjunto de critérios de desempenho.
3. Um processo global comum para a identificação, análise, avaliação e tratamento de riscos.
4. Orientação sobre como esse processo deve ser integrado nos processos de tomada de decisão de qualquer organização.

A ABNT ISO 31.000 (ABNT, 2009) pode ser utilizada por qualquer organização pública ou privada e não é direcionada a qualquer ramo específico. Não se trata de uma norma destinada à certificação e, apesar de sua intenção de generalizar e padronizar a gestão de riscos, seu texto faz a seguinte ressalva (em tradução livre):

A concepção e implementação de planos de gestão de riscos e frameworks terá de levar em conta as diferentes necessidades de uma organização específica, os seus objetivos específicos, estrutura, contexto, operações, processos, funções, projetos, produtos, serviços ou ativos e práticas específicas empregadas.

Figura 2.11 - Modelo de gestão de riscos da ABNT ISO 31.000.

Fonte: ABNT (2009).

Ainda que tenha gerado polêmicas, segundo vários autores, vide Aven (2011), Purdy (2010) e Leitch (2010), a norma ABNT ISO 31.000 define o risco como um efeito da incerteza sobre os objetivos, que pode se manifestar de forma positiva (resultados superiores ao esperado, lucro, etc.) ou negativa (visão tradicional do risco).

Além de apresentar as definições de termos utilizados e os princípios que a regem, a ISO 31.000 traz um modelo de processo de gestão de riscos, que pode ser visualizado na Figura 2.11. Purdy (2010) revela que esse modelo foi extraído da norma AS/NZS 4360:2004, após o estudo de várias alternativas. Apesar de o modelo sugerir a evolução do processo de gestão em etapas sucessivas, percebe-se que há iterações entre os passos e entre estes e os elementos de comunicação e

também de monitoramento, o que é representado na Figura 2.11 pelas setas bidirecionais. Purdy (2010) também argumenta que estes elementos (comunicação e monitoramento) podem ser considerados como em contínua atuação e desenvolvimento.

A norma ABNT ISO 31.000 tem aplicabilidade na gestão de riscos no desenvolvimento de produtos, mas Oehmen et al (2010) observaram a existência de várias lacunas entre a norma e a prática corrente, que podem se tornar objetos de pesquisas futuras, principalmente sobre a aplicabilidade da norma no projeto e desenvolvimento de produtos e na apresentação de estudos de casos.

2.5 Tópicos de estatística bayesiana

Segundo Montgomery e Runge (2011), o conceito de probabilidade é usado para quantificar a chance de um determinado resultado acontecer num experimento aleatório. Também pode representar uma frequência relativa, como por exemplo, o número de peças falhadas dentro de uma população. Tais visões fazem parte da chamada abordagem frequentista, ou clássica, (BOLSTAD, 2004), que está baseada nas seguintes ideias:

1. Parâmetros, ou características da população são constantes fixas e desconhecidas.
2. Probabilidades são sempre interpretadas como frequências relativas de um experimento demasiadamente longo.
3. Os processos estatísticos são avaliados com base no desempenho hipotético de um número infinito de repetições do experimento.

Outra importante interpretação para probabilidade é a de grau de crença de que um resultado ocorrerá. Esta abordagem é conhecida por bayesiana devido à utilização do teorema de Bayes e possui as seguintes características (BOLSTAD, 2004):

1. Devido à incerteza quanto ao real valor dos parâmetros, estes são considerados como variáveis aleatórias. As regras de probabilidade se aplicam para fazer inferências sobre os parâmetros.

2. As afirmações sobre os parâmetros são interpretadas como graus de crença, que são revisados a partir de novas informações. Isto significa que a inferência é baseada nos dados reais e não num conjunto de todos os possíveis resultados.

A “objetividade” da probabilidade frequentista não considera qualquer conhecimento prévio do processo que está sendo medido, o que muitas vezes não acontece. Por outro lado, a estatística Bayesiana utiliza duas fontes de informação: a prévia informação que temos sobre o processo e as informações sobre o processo contidas nos dados. Eles são combinados usando o teorema de Bayes, que é a única ferramenta desta abordagem (BOLSTAD, 2004)

2.5.1 Probabilidade condicional e teorema de Bayes

A probabilidade condicional de um evento B dado que A ocorreu é expressa pela fórmula 2.17.

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (2.17)$$

A probabilidade condicional é proporcional à probabilidade conjunta $P(A \cap B)$, porém é redimensionada por $P(A)$ de forma que a probabilidade do universo reduzido (A) seja igual a 1. A expressão da probabilidade condicional pode ser reescrita de modo a compor a chamada regra da multiplicação, na forma da equação 2.18.

$$P(A \cap B) = P(B|A).P(A) = P(A|B).P(B) \quad (2.18)$$

Para o caso de haver n eventos $B_1, B_2, \dots, B_n$ de tal modo que:

- A união $B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_n = U$, universo e,
- Todos pares distintos dos eventos são disjuntos, $B_i \cap B_j = \emptyset$, para $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n$, com $i \neq j$.

O conjunto de eventos $B_1, B_2, \dots, B_n$ particiona o universo. Um evento observável A será particionado de forma expressa pela equação 2.19.

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A \cap B_i) \quad (2.19)$$

Isto é conhecido como a lei da probabilidade total, que diz que a probabilidade de um evento A é a soma das probabilidades de todas as suas partes disjuntas, (BOLSTAD, 2004). Usando a regra de multiplicação em cada probabilidade conjunta, obtém-se a equação 2.20.

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i) \times P(B_i) \quad (2.20)$$

Usando a regra de multiplicação para encontrar a probabilidade conjunta no numerador, e a lei da probabilidade total no denominador, resulta na equação 2.21.

$$P(B_i|A) = \frac{P(A|B_i) \cdot P(B_i)}{\sum_{i=1}^n P(A|B_i) \times P(B_i)} \quad (2.21)$$

Seja $B_1, B_2, \dots, B_n$ um conjunto de eventos não observáveis que particiona o universo e $P(B_i)$ para $i = 1, \dots, n$ a probabilidade a priori dos eventos $B_1, B_2, \dots, B_n$. Esta distribuição fornece o peso de cada um dos eventos B_i com base numa crença a priori ou anterior. Então, o evento A (evidência) ocorre.

A função de verossimilhança dos eventos $B_1, B_2, \dots, B_n$ é a probabilidade condicional que A ocorreu dado B_i para $i = 1, \dots, n$. Ela é expressa por $P(A|B_i)$. A função de verossimilhança é o peso dado para cada um dos eventos $B_1, B_2, \dots, B_n$, dado a ocorrência de A .

$P(B_i|A)$ para $i = 1, \dots, n$ é denominada de probabilidade a posteriori do evento B_i dado que o evento A ocorreu. Ela combina uma ideia ou crença anterior com a evidência dada pela ocorrência do evento A .

2.5.2 Inferência bayesiana

A utilização da teoria bayesiana para gerar grandezas em confiabilidade permite ao analista usar informações de fontes alternativas de dados de falha – dados de *handbook*, dados de equipamentos análogos, opinião de especialistas – na formulação de uma função de probabilidade de um parâmetro de interesse, (MOURA et al, 2007).

Suponha que θ represente algum parâmetro de interesse, o qual assume um comportamento probabilístico. A função $\pi_0(\theta)$ representa uma distribuição a priori em θ , que é baseada na informação disponível antes de se observar uma evidência E , baseada em dados empíricos. A função de verossimilhança $L(E|\theta)$ modela os dados evidenciados em E . A função $\pi(\theta|E)$ é a distribuição a posteriori e é obtida pela aplicação do teorema de Bayes na forma da equação 2.22.

$$\pi(\theta|E) = \frac{L(E|\theta) \cdot \pi_0(\theta)}{\int_{\theta} L(E|\theta) \times \pi_0(\theta) d\theta} \quad (2.22)$$

2.5.2.1 Inferência bayesiana de variáveis aleatórias discretas empregando distribuições a priori discretas

De acordo com Montgomery e Runge (2011), em engenharia e nas ciências aplicadas, as variáveis aleatórias discretas estão frequentemente associadas a contagens. Sua distribuição é frequentemente especificada por uma lista de possíveis valores, juntamente com as suas probabilidades. Em alguns casos, é conveniente expressar a probabilidade em termos de uma fórmula.

Certos tipos de distribuições discretas, como Poisson e Binomial, são expressas em função de parâmetros, que, em aplicações práticas, precisam ser estimados. Deste modo, pode-se recorrer à inferência bayesiana. Uma vez desconhecido o verdadeiro valor de um parâmetro π , este pode ser representado

por uma distribuição a priori discreta¹⁰, construída de acordo com a informação disponível que se tem sobre o parâmetro. A inferência bayesiana de uma variável discreta pode ser executada a partir dos seguintes passos, apresentados por Bolstad (2004):

1. Construa uma tabela cujas colunas receberão os seguintes títulos: parâmetro, distribuição a priori, função de verossimilhança, produto priori x verossimilhança, distribuição a posteriori.
2. Coloque os valores do parâmetro, da priori e da verossimilhança nas respectivas colunas.
3. Ato contínuo, coloque na respectiva coluna os valores da multiplicação priori x verossimilhança.
4. Some os valores da coluna priori x verossimilhança.
5. Divida os valores da coluna priori x verossimilhança pela soma encontrada.
6. Os valores da divisão acima correspondem à coluna da distribuição a posteriori.

2.6 Manutenção

O substantivo latino *manus*, *-us*, forma um interessante grupo de palavras por meio da justaposição de um verbo. Traduzido por mão, poder, força ou trabalho, *manus*, *-us* origina os termos manufaturar (fazer à mão) e manuscrito (escrito à mão). O combinado *manu* + *tenere* (ter em mãos), por sua vez, dá origem à palavra manutenção.

Mesmo cancelada, a norma MIL-STD-721 (*Definition of terms for reliability and maintainability*) ainda é um importante glossário para confiabilidade, definindo manutenção como “todas as ações necessárias para manter ou restaurar um item dentro de uma condição específica” (DOD, 1981). Entre várias outras definições, a norma ainda apresenta dois termos de grande importância para o contexto do presente trabalho:

---

¹⁰ Este texto está limitado propositalmente a este caso muito particular em virtude da aplicação do método proposto. O leitor pode encontrar este caso e o emprego de distribuições a priori contínuas em Bolstad (2004).

1. Evento de manutenção – uma ou mais ações de manutenção demandadas para efetuar uma manutenção devido a uma falha, falso alarme ou plano de manutenção;
2. Ação de manutenção – um elemento de um evento de manutenção. Uma ou mais tarefas (localização da falha, isolamento da falha, inspeção) necessárias para manter ou retornar um item a uma condição específica.

Moubray (1997) simplifica a definição de manutenção ressaltando que a mesma “assegura que um ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que faça”, ou seja, desempenhe suas funções dentro de um contexto de operação. Se, por algum motivo, esse ativo deixa de cumprir suas funções satisfatoriamente, pode-se dizer que o mesmo falhou.

A definição de falha, ainda que intuitivamente simples, traz em seu contexto muitos desdobramentos. De acordo com a MIL-STD-721, falha é “o evento, ou estado inoperante, no qual um item ou parte de um item não desempenha ou não desempenhará conforme especificado”, (DOD, 1981).

A relação entre a manutenção e a falha permite dividi-la em duas importantes vertentes, de acordo com a MIL-STD-721 (DOD, 1981):

1. Manutenção corretiva – definida como todas as ações executadas, que foram provocadas por uma falha, com o objetivo de restaurar o item a uma condição de desempenho na qual foi especificado.
2. Manutenção preventiva – todas as ações desempenhadas para que o item mantenha-se dentro das condições de desempenho nas quais foi especificado.

2.6.1 Manutenção e ciclo de vida

Segundo Takata et al (2004), a manutenção é necessária para controlar as condições de um produto e readaptá-las às necessidades dos clientes e da sociedade, devendo envolver as seguintes atividades:

1. Projeto para manutenibilidade – melhorar o projeto a partir da avaliação de manutenibilidade do produto durante seu desenvolvimento e com base no planejamento de estratégias de manutenção;
2. Planejamento de estratégias de manutenção – seleção apropriada para cada parte do produto;
3. Controle de tarefas de manutenção – planejar e executar as tarefas de manutenção baseadas na estratégia selecionada;
4. Avaliação dos resultados de manutenção – determinar se o planejamento e controle estão adequados;
5. Melhoria da manutenção e produtos - melhorar a manutenção tarefa de controle de manutenção, planejamento, estratégia e até mesmo design de produto com base na avaliação dos resultados de manutenção;
6. Planejamento de retirada do produto e fim do ciclo de vida.

Figura 2.12 - Manutenção e desempenho funcional.

Fonte: adaptado de Takata et al. (2004)

A visão de Takata et al (2004) sobre o ciclo de vida do material evidencia uma maior importância para o papel da manutenção, podendo até mesmo alterar o projeto do produto. A Figura 2.12, proposta pelos autores exemplifica algumas atividades de manutenção e sua relação com o desempenho funcional. De maneira simples, a manutenção faz-se necessária quando este desempenho torna-se menor

do que o nível requisitado. Havendo alteração deste índice, tal qual o salto apresentado no final da figura, um *upgrade* do produto é impositivo.

Figura 2.13 - Manutenção ao longo do ciclo de vida.

Fonte: adaptado de Takata et al. (2004)

Desta maneira, Takata et al (2004) visualizam o papel da manutenção conforme o *framework* apresentado na Figura 2.13, havendo três ciclos. O menor está associado à manutenção rotineira. O segundo ciclo já envolve o planejamento

estratégico de manutenção. Por fim, o terceiro e maior ciclo incorpora ações que repercutem no projeto do produto, abrindo uma frente para a correção de problemas de projeto e melhoramento de funcionalidades e de desempenho.

2.6.2 Gestão da manutenção

Murthy et al (2002) argumentam que a gestão de manutenção está estruturada em três passos: entender o equipamento que sofrerá manutenção, planejar ações ótimas de manutenção e implementar essas ações. O planejamento de ações de manutenção é determinado a partir de um processo de decisão que envolve coleta de dados, interpretação, proposta de modelos e escolha de uma melhor alternativa.

Söderholm; Holmgren e Klefsjö, (2007), na visão de manutenção como processo, fazem um paralelo com o ciclo de melhoria PDSA (*Plan – Do – Study – Act*) de Deming, estabelecendo as seguintes fases:

1. Planejamento da manutenção, cujas entradas são as informações sobre as condições do equipamento, além do que os autores denominam de documentação de manutenção, ou seja, documentos formais sobre objetivos, estratégias e políticas de manutenção. Esta fase tem como saída um plano de manutenção, que é um conjunto estruturado de tarefas que inclui ações, procedimentos, recursos e base de tempo para a manutenção;
2. Execução da manutenção, que, além do plano de manutenção, tem como entrada condições circunstanciais (ambiente, tempo, recurso disponível);
3. Teste funcional, que visa atestar a correção do processo de manutenção executado por meio da verificação do desempenho do equipamento. Pode ser aplicado iterativamente com a execução da manutenção;
4. Realimentação de informações. As informações originadas nos testes possibilitam atestar as condições do equipamento. Entretanto, o ciclo de informações pode influenciar, por meio de estudos apropriados, não

somente o plano de manutenção como até objetivos, estratégias e políticas de manutenção.

2.6.2.1 Modelos de Recuperação

Desenvolvendo estudos sobre o fluxo de operações em processos de recuperação, Gharbi et al (1996), postularam uma sequência de trabalho geral, a qual está representada na Figura 2.14. Tal trabalho discutiu métodos de simulação adequados à recuperação, sendo que os autores salientam a presença de fatores críticos, como a grande dependência em relação ao estado de conservação do produto a ser recuperado e a dificuldade de previsão do volume de trabalho necessário. Neste sentido, tal como proposto na conclusão do artigo, o controle da produção de um processo de recuperação requer uma maciça aplicação de métodos estatísticos e de análise de experimentos.

Figura 2.14 - Sequência de um processo de recuperação.

Fonte: Gharbi et al (1996)

O mesmo grupo de Gharbi e demais pesquisadores também apresentou diversos trabalhos sobre o controle de produção da recuperação – vide Gharbi et al (2008), Berthaut et al (2010), Pellerin et al (2009) e Berthaut et al (2009), ressaltando o papel crucial do controle de estoque de sobressalentes para o andamento da produção, uma vez que incertezas quanto à demanda podem levar a rupturas do

fluxo de suprimento devido à falta de sobressalentes quando necessário. De forma oposta, excesso de estoque representa custos desnecessários ao processo, o que pode ser agravado com a possibilidade de sobras ao final do mesmo.

2.6.2.2 Extensão da vida útil

O termo *Service Life Extension* – extensão da vida útil (ou de serviço), em tradução livre - é empregado dentro do Departamento de Defesa norte-americano (DoD) para designar os trabalhos de recuperação e modernização de um produto de defesa visando um prolongamento de sua vida operacional. A expressão *Service Life Extension Program* é utilizada para designar os projetos de extensão da vida útil de sistemas militares, de acordo com o produto de defesa associado. Na página da *Defense Acquisition University* (DAU, 2013), subordinada ao DoD, pode-se encontrar material de referência sobre o assunto e notícias sobre alguns programas em execução.

O *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge*, (PYSTER et al, 2012), dentro do tópico de gestão de vida do produto, apresenta, ao lado dos termos *upgrade* e *modernization*, a expressão *Service Life Extension*, associando-a a uma série de atividades de manutenção e modernização do produto para sua adaptação a um novo cenário. De acordo com o guia, tal processo torna-se necessário quando:

1. O sistema já não atende satisfatoriamente requisitos de desempenho e confiabilidade.
2. Os custos de operação e manutenção atingiram níveis críticos.
3. Peças sobressalentes não estão mais disponíveis para a manutenção.
4. O funcionamento do sistema viola as normas e/ou regulamentos, tais como as normas ambientais ou de segurança.
5. Algumas partes do sistema estão prestes a atingir os seus limites de vida operacional, que pode resultar num dos problemas listados acima.

2.6.3 Gestão de ativos físicos

A organização sem fins lucrativos denominada *The Institute of Asset Management* (IAM) está encarregada da consolidação da disciplina de gestão de

ativos físicos¹¹ (IAM, 2013), contribuindo para seu desenvolvimento. Em 2008, por intermédio de uma parceria com o *British Standard Institution* (BSI), o IAM desenvolveu um documento de consulta pública (PAS – *Publicly Available Specification*), denominado PAS 55 (BSI, 2008), cuja evolução resultou na publicação de uma norma específica pela própria ISO.

A ABNT ISO 55.000 vem ao encontro do esforço em estabelecer termos, definições e requisitos para a implantação de um sistema de gestão de ativos físicos. Trata-se, na verdade, de uma família de normas: a ABNT ISO 55.000, que apresenta uma visão geral, princípios e terminologia, (ABNT, 2014); a ABNT ISO 55.001, que define os requisitos de um sistema de gestão, (ABNT, 2014a); e a ABNT ISO 55.002, que apresenta diretrizes para a aplicação da ABNT ISO 55.001, (ABNT, 2014b).

Inicialmente, a ABNT ISO 55.000 apresenta uma série de conceitos, como a da própria gestão de ativos físicos, definida por uma “atividade coordenada de uma organização para obter valor a partir dos ativos”, (ABNT, 2014). Esta definição pode ser comparada com a fornecida pelo texto da PAS 55 (BSI, 2008):

Atividades e práticas sistemáticas e coordenadas que uma organização dispõe para gerenciar de forma otimizada e sustentável seus ativos e sistemas de ativos, desempenhos associados, riscos e investimentos ao longo de seu ciclo de vida, com o propósito de alcançar o planejamento estratégico de sua organização (BSI, 2008)

A abordagem da gestão de ativos físicos pode ser sintetizada por meio de seus princípios, representados pela Figura 2.15. São considerados facilitadores essenciais para a aplicação de seus princípios os seguintes fatores. (BSI 2008):

1. Uma estrutura organizacional baseada em liderança e direção clara.
2. Compromisso, competência e coordenação da equipe.

---

¹¹ Apesar de não possuir o termo “físico” em seu título, a própria ISO 55.000 ressalta, por meio de sua Nota 1, que “esta Norma é destinada a ser utilizada para a gestão de ativos físicos, mas pode ser aplicada a outros tipos de ativos” (ISO, 2014). No texto desta tese, utilizar-se-á o termo “ativo físico”, tendo em vista não provocar confusão com a gestão de ativos de outro tipo, como os ativos financeiros, cuja associação a “gestão de ativos” é bem mais antiga e difundida.

3. Informação e conhecimento adequados das condições dos ativos, desempenho, riscos e custos, bem como de suas interações.

Figura 2.15 - Princípios de gestão de ativos.

Fonte: BSI (2008).

À semelhança de outras normas de gestão, a ABNT ISO 55.000 também possibilita que organizações sejam certificadas pela conformidade com seus requisitos. Sobre essa questão, Michie e Mundy¹² (2011) noticiam que várias organizações buscam a certificação como forma de implantação da gestão de ativos físicos, atentando para os benefícios percebidos pela melhor eficiência no planejamento de investimentos (consideração de custos ao longo do ciclo de vida), pela melhor compreensão dos ativos (consequência do emprego de gestão de riscos) e pela prática de um regime amplo de gestão para assegurar bons resultados.

2.6.3.1 Sistema de gestão de ativos

A estrutura do sistema de gestão de ativos proposta pela ABNT ISO 55.000 é apresentada graficamente pela Figura 2.16, que dispõe sobre as relações entre os elementos-chave do sistema.

¹² O texto dos autores refere-se à PAS 55, mas evidentemente pode ser aplicado à ABNT ISO 55.000.

Figura 2.16 - Estrutura de gestão da ABNT ISO 55.000.

Fonte: ABNT (2014b).

Há uma grande integração do sistema de gestão de ativos com o próprio sistema de gestão da organização, em termos de política e estratégia, pois estas devem ser “derivadas de e consistente com” suas equivalentes organizacionais.

O planejamento da gestão de ativos evidencia a sua aplicação ao longo de todo o ciclo de vida. O impacto de ações tomadas num determinado momento (fase) do ciclo de vida deve ser considerado também nas demais fases. Também a ABNT ISO 55.000 ressalta a importância da integração entre planejamentos, com a otimização e priorização de ações. Planos de contingência têm destaque na norma, como decorrência da utilização estimulada de métodos e técnicas de análise de riscos.

2.6.3.2 O papel de gestão de riscos na gestão de ativos físicos

Por ser baseada em riscos, a gestão de ativos físicos traz em seu contexto a visão da gestão de riscos como importante fundamento de proatividade, ressaltando sua integração com todos os processos gerenciais, (BSI, 2008).

Em relação a métodos aplicados na gestão de riscos, a ABNT ISO 55.002 (ABNT, 2014b) considera que a organização adote um método estruturado para a identificação, análise e avaliação dos riscos, como, por exemplo:

1. Classificação de ativos e definição do escopo – fase de planejamento, coleta de informações e definições de escopo e limites das análises posteriores.
2. Identificação de riscos possíveis – processo de criação de listas de eventos possíveis e suas causas.
3. Identificação de controles de riscos existentes.
4. Determinação do nível do risco – estimação de probabilidades e consequências de cada evento potencial, considerando os controles atuais.
5. Determinação da tolerância com os riscos – decidir se os controles existentes ou planejados (de ativos a ser propostos ou planejados) são

suficientes para manter aceitáveis os riscos e estão de acordo com demais requisitos legais, estatutários e demais aplicáveis.

A identificação e análise de riscos são baseadas no conceito do produto probabilidade x consequência, de tal sorte que ambos os fatores devem ser considerados. Apesar de apresentar alguns métodos e técnicas para a identificação e análise de riscos, a ABNT ISO 55.000 não é prescritiva, reconhecendo que as organizações devem considerar a adoção de técnicas apropriadas de acordo com a criticidade dos ativos e os tipos de riscos observados.

2.6.4 Manutenção e confiabilidade: processo de renovação generalizado

De acordo com Pham & Wang (1996), a manutenção pode ser classificada de acordo com o grau para o qual são restauradas as condições operacionais de um item, na seguinte forma:

1. Reparo perfeito ou manutenção perfeita: a ação de manutenção restaura as condições de operação do sistema para tão bom quanto novo, ou seja, o sistema passa a ter a mesma distribuição de confiabilidade e taxa de falhas que um sistema novo. De acordo com Yañez; Joglar; Modarres (2002), a manutenção perfeita é modelada pelo processo de renovação. Por representar uma situação ideal, é um modelo limitado, mais propício a sistemas compostos de módulos não reparáveis que são repostos após a falha.
2. Reparo mínimo ou manutenção mínima: uma ação que restaura o sistema para valor de taxa de falha que o mesmo possuía quando falhou. Um bom exemplo é a troca de pneu furado, ação de manutenção que não altera a taxa de falhas do sistema carro como um todo. Neste caso, o sistema reparado torna-se tão ruim quanto velho.
3. Reparo imperfeito ou manutenção imperfeita: uma ação que não faz o sistema ser tão bom quanto novo, porém o faz um pouco mais novo. A ação retorna o item a uma posição intermediária entre tão bom quanto novo e tão ruim quanto velho. A retífica de motores é um bom exemplo desta condição.

4. Manutenção para pior¹³: aumenta a taxa de falhas do sistema, aumenta a idade do sistema.
5. Pior¹⁴ Manutenção: uma ação de manutenção que leva à falha do sistema.

Kijima & Sumita (1986) propuseram um modelo probabilístico denominado processo de renovação generalizado, que visa abordar todos os estados de manutenção. Supondo que um sistema é reparado n vezes em intervalos de tempo $X_1, X_2, \dots, X_n$, a idade real do sistema pode ser calculada pelo somatório dos tempos de operação até a falha, como na equação 2.23.

$$S_n = \sum_{i=0}^n X_i \quad (2.23)$$

Na base do modelo de Kijima, está o conceito de idade virtual (A_n), que representa a redução na idade real do sistema promovida pela n -ésima ação de reparo. A idade virtual é obtida pela aplicação de um parâmetro α , que é proposto dentro deste modelo, de forma a representar o tipo de manutenção que o sistema recebe. Em linhas gerais, têm-se:

- O reparo perfeito é representado por $\alpha = 0$, o que retorna a idade virtual a zero;
- O reparo mínimo é representado por $\alpha = 1$, significando que a idade virtual é igual à idade real do sistema;
- O reparo imperfeito é representado por $0 < \alpha < 1$, significando que a idade virtual do sistema retorna a um valor intermediário;
- Outros valores para o parâmetro α são também possíveis, como $\alpha < 0$ e $\alpha > 1$ que correspondem ao “reparo melhor¹⁵” e ao “reparo para pior”, respectivamente, (MOURA et al, 2007).

A partir da assunção de um valor de α , a idade virtual do sistema após o n -ésimo reparo é calculada pela equação 2.24.

---

¹³ Do inglês *worst*.

¹⁴ Do inglês *worse*

¹⁵ Pham & Wang (1996) não previram este tipo de manutenção, que significa que o sistema fica melhor do que o novo.

$$A_n = A_{n-1} + \alpha X_n = \alpha \cdot S_n \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.24)$$

Se A_n for igual a um valor y , então o sistema terá um tempo até a $(n + 1)$ -ésima falha (X_{n+1}), que é distribuída de acordo com a seguinte função acumulada, expressa na equação 2.25.

$$F(X|A_n = y) = \frac{F(X + y) - F(y)}{1 - F(y)} \quad (2.25)$$

2.7 Algumas contribuições sobre modernização de sistemas

2.7.1 Modernização de sistemas legados

Ainda que voltado para a engenharia de software, o livro “*Modernizing legacy systems*” (Seacord; Plakosh; Lewis, 2003), apresenta uma detalhada análise de caso vivida por seus autores, quando na modernização de um complexo sistema corporativo de suprimento. Apelidado de “a besta”, o sistema em estudo havia sido desenvolvido ao longo de 30 anos e continha aproximadamente 1.800.000 linhas de código. Um trabalho de modernização desse tipo exigiria um amplo processo de engenharia reversa, o que é agravado pelo fato de que, originalmente, o sistema fora escrito em linguagem COBOL, não mais tão popular quanto era na época de sua criação. Uma anedota é citada por Seacord; Plakosh; Lewis (2003): “quando foi perguntado se havia alguém que entendia o sistema, responderam que sim, mas que estavam todos mortos.”

A assustadora grandiosidade do desafio e a escassez de referências motivaram os autores a desenvolver uma metodologia de trabalho que pudesse ser aplicada a contento. Desta forma, os autores formalizaram a abordagem denominada de *Risk-managed modernization (RMM)*, que está sintetizada na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Modelo para modernização de sistemas legados.

Fonte: Seacord; Plakosh; Lewis (2003).

O modelo de Seacord; Plakosh; Lewis (2003) tem uma primeira fase (análise de portfólio) ligada a elaboração e análise de um caso de negócio – documento que apoia o planejamento e tomada de decisão a partir da provisão de informações sobre propósitos e objetivos do projeto, da descrição do sistema corrente (a ser modernizado), da descrição do novo sistema, de uma estimativa de custos, de análises de custo-benefício, e de outras análises necessárias como avaliações sobre risco e análises de modificações. Uma tomada de decisão feita considerando *stakeholders* e requisitos pode terminar o projeto.

Figura 2.18 - Modelo da ferradura para modernização de sistemas legados.

Fonte Seacord; Plakosh; Lewis (2003).

Caso se prossiga, o modelo tem uma segunda fase determinada pelo estudo e entendimento mais detalhado do sistema legado e das tecnologias disponíveis para serem incorporadas. A respeito desta importante fase, os autores apresentam o “modelo da ferradura”, ilustrado na Figura 2.18 que representa a reengenharia do sistema a partir de três processos básicos:

1. Reconstrução, relacionada ao entendimento e compreensão do sistema. Na Figura 2.18, a reconstrução é representada pela seta para cima, que parte de uma origem (como se trata de *software*, são as linhas de código do programa) para níveis cada vez mais abstratos: estrutura de códigos, representações de funções, representações da arquitetura e a própria arquitetura do sistema.
2. Transformação, cuja seta para direita representa a passagem do velho para o novo, que pode ocorrer nos vários níveis apresentados. Os autores apresentam três níveis de transformações (de código, de funções e da arquitetura), cuja complexidade é crescente.
3. Refinamento, que significa que qualquer transformação, ainda que seja feita num nível mais abstrato (na arquitetura, por exemplo) requer sua implementação no código do programa.

Apesar de se tratar de uma análise de caso de um software, o livro de Seacord; Plakosh; Lewis (2003) é apontado como uma das referências principais

sobre modernização de sistemas pelo *Systems Engineering Body of Knowledge* (PYSTER et al, 2012), que ressalta o modelo da ferradura e os níveis de transformação do sistema. O trabalho de Seacord; Plakosh; Lewis (2003) também contribui com uma breve teoria sobre modernização. Na palavra dos autores, uma modernização está no meio termo entre manutenção e reposição do sistema (substituição por um novo sistema, desenvolvido a partir do “rascunho”), requerendo uma porção significativa de modificações sem, no entanto, alterar funcionalidades básicas. A modernização também pode ser classificada a partir do nível de entendimento sobre o sistema:

1. Modernização caixa-branca, desenvolvida com o entendimento completo sobre o sistema. Caso seja necessário, requer um processo de compreensão do sistema (reengenharia).
2. Modernização caixa-preta, desenvolvida com entendimento parcial do sistema, a partir da compreensão de apenas alguns processos fundamentais e de suas interfaces.

2.7.2 Recuperação e modernização de sistemas de grande porte

Gorgone (1992) apresentou um estudo de caso descrevendo a recuperação e modernização de dois porta-aviões norte-americanos (o USS KIDD e o USS CONSTELLATION). Seu trabalho descreve como se deu uma gestão de riscos nos dois projetos. Para o autor, o problema central está no dimensionamento correto dos trabalhos autorizados, que, infelizmente são limitados por razões ligadas ao teto do orçamento previsto. No primeiro caso abordado (USS KIDD), os trabalhos de recuperação e modernização do navio foram revisados de forma a focar aqueles equipamentos e sistemas com potenciais de falha que forçariam o estaleiro a realizar trabalho não previsto inicialmente. Em linhas gerais, tratou-se de um plano de gestão de riscos de projeto com o estabelecimento de um segundo orçamento, de maior valor do que o inicial. Apesar desse orçamento acrescido não ter sido escolhido, o estaleiro monitorou os riscos e aplicou diversos planos de contingência onde coube.

Para o segundo caso, Gorgone (1992) relata que o volume de trabalho bem maior para a recuperação e modernização do USS CONSTELLATION exigiu o estabelecimento de um processo mais apurado. As análises de risco foram baseadas na probabilidade e consequência de uma falha em relação ao impacto tanto para o estaleiro (testes, certificações, eventos no cronograma) quanto para a força naval (capacidade). Uma planilha foi empregada para avaliação do risco, a partir da multiplicação de diversos fatores de probabilidade e consequência, de modo a explicitar pontos críticos (Gorgone empregou índices próprios e internos para qualificação dos fatores). Diversas ações foram estabelecidas para os itens críticos, como: revisão de procedimentos, previsão e/ou reforço de testes, monitoramento continuado, etc.

2.7.3 Consideração sobre riscos e oportunidades na infusão de tecnologia no projeto de sistemas

Smaling e De Weck (2007) desenvolveram um método para a avaliação da infusão de novas tecnologias num produto, que é baseado no uso de uma DSM obtida a partir da identificação dos quatro tipos de interações propostos por Pimmler e Eppinger (1994): físicas, energéticas, de material e informacionais.

Na verdade, o método de Smaling e De Weck (2007) emprega o conceito de Δ DSM, uma matriz construída a partir da DSM e que é obtida considerando-se apenas das mudanças causadas por uma nova tecnologia. Com base nos quatro tipos de interações, os autores sugerem oito tipos de alterações que devem ser consideradas para o cálculo de um índice de invasão de tecnologia:

1. Alterações em interações físicas entre componentes de um mesmo subsistema.
2. Alterações em interações físicas entre componentes de subsistemas diferentes.
3. Alterações em interações energéticas.
4. Alterações em interações de massa.
5. Alterações em interações informacionais.
6. Alterações no próprio projeto do componente.

7. Inserção de componentes.
8. Exclusão de componentes.

O índice de invasão de tecnologia é calculado para representar a quantidade de mudanças provocadas por uma infusão de tecnologia no projeto original. Seu valor é obtido por meio de uma soma ponderada de todos os tipos de alterações. Os pesos são definidos pela opinião de especialistas, considerando o impacto de cada tipo de alteração para o produto.

O modelo considera que quanto menor o índice de invasão de tecnologia, o mais facilmente implementável e menos incerta uma configuração é. Particularmente, Smaling e De Weck (2007) empregam o índice de invasão como um tipo de multiplicador de riscos dentro do modelo proposto por Browning et al. (2002). Este modelo trabalha com riscos associados ao não atingimento de determinadas metas para medidas de desempenho técnico, que são representadas por distribuições de probabilidade.

Resumidamente, o modelo de Smaling e De Weck (2007) penaliza a quantidade de modificações de uma alternativa de projeto sem considerar a qualidade da contribuição de cada modificação, uma vez que os fatores de peso para o cálculo do índice de invasão estão relacionados apenas ao tipo de alteração. Exemplificando, duas alternativas que têm as mesmas quantidades para cada tipo de alteração receberiam o mesmo índice de invasão de tecnologia, independente se, numa delas, as modificações ocorressem em componentes mais críticos. Outro exemplo de certa inconveniência seria uma modificação para correção de um erro de projeto ou para a redução de riscos, ações que seriam penalizadas pelo cálculo proposto. Apesar dos exemplos fornecidos, deve-se considerar que o modelo de Smaling e De Weck foi originalmente destinado á incorporação de novas tecnologias, numa provável situação de consideráveis incertezas em relação às alterações em interações.

O modelo de Smaling e De Weck para a medição de complexidade por meio do cálculo de um índice de invasão também é utilizado, com algumas modificações, por Suh et al. (2008)¹⁶.

2.7.4 Outras contribuições

Tangen e Foss (1995) propuseram um sistema de decisão para a modernização de usinas hidrelétricas. Diferenciando a recuperação e modernização dos trabalhos de manutenção, os autores admitem a complexidade desse tipo de projeto e identificam diversos *tradeoffs* entre manter componentes ou modernizá-los. O processo decisório multicritério visaria alocar inteligentemente os recursos disponíveis, otimizando resultados, numa clara demonstração da tensão provocada pelos custos mais altos da alternativa de modernizar parte de um sistema.

Gee (2009) enfatiza a importância de uma abordagem de Engenharia de Sistemas para a atualização de sistemas militares. O autor discute a aplicação de análises de requisitos e o emprego de modelagem e simulação como ferramentas para a modernização. Apresentando o modelo ilustrado na Figura 2.19, o autor enfatiza a importância de *tradeoffs* entre necessidades de modernização e diversas restrições, incluindo a idade e estado de conservação dos componentes, limitações tecnológicas e de desempenho. Para Gee (2009), um sistema está estruturado em vários níveis (subsistemas) até chegar ao da peça. A modificação de uma peça ou de um subsistema requer uma análise “de baixo para cima” (*bottom-up*) sobre o impacto dessa modificação no nível acima até se chegar a um ponto de não continuidade de sua influência.

Nitu (2011) propôs um modelo geral para a modernização de sistemas a partir de três processos: processos de gestão, processos de negócio e processos de apoio. Os processos de gestão referem-se a atividades de planejamento e gestão de projetos. Os processos de negócio abrangem as atividades técnicas específicas para a modernização do produto. Processos de apoio referem-se às atividades de administração de recursos humanos, gestão de materiais, informática e todas aquelas necessárias para a execução da empreitada. O modelo de Nitu está

---

¹⁶ Embora no modelo de Suh, o cálculo do índice leva em conta a proporção entre células não vazias da Δ DSM em relação à DSM.

centrado na figura do cliente e se apoia no tripé adaptação-preparação-implementação, de acordo com cada um dos três processos. Seu maior objetivo é traduzir as necessidades do cliente, atualizando-as na modificação/modernização do produto.

Figura 2.19 - Modelo para modernização de sistemas.

Fonte: Gee (2009).

Lock (2012) apresentou a aplicação de gestão de riscos como ferramenta para a evolução de sistemas de sistemas. Empregando mais precisamente a técnica HAZOP, Lock analisou possíveis riscos provenientes na evolução do ambiente que circunda o produto (requisitos, cenários, cadeia de suprimento, dependência externa, etc). Os exemplos apresentados pelo autor são qualitativos e tratam de possíveis consequências de problemas originados durante a fase operacional.

3 Metodologia proposta para a gestão de projetos de recuperação e modernização

3.1 Considerações sobre a metodologia proposta para a recuperação e modernização

O presente capítulo destina-se a descrever a metodologia proposta por esta tese. Trata-se de uma metodologia dividida em seis partes ou passos, cada uma voltada para uma determinada atividade a ser desenvolvida durante as fases de projeto, produção e a nova fase de operação do produto que passa por uma recuperação e modernização.

3.1.1 Da aplicação da metodologia proposta

Inicialmente, é necessário ressaltar que a metodologia proposta aplica-se a uma situação quando já se determinou que um produto deverá passar por um processo de recuperação e modernização. O produto estaria no final de fase de operação e haveria o interesse em prolongá-la. A metodologia proposta não envolve a decisão entre recuperar/modernizar ou adquirir novo sistema.

A metodologia proposta está associada à ideia de modernização durante a recuperação.

3.1.2 Do projeto de recuperação e modernização

O projeto da recuperação e modernização de um produto define qual configuração este tomará ao final de um processo de produção e de que forma haverá esta “transformação”. Por esse processo, entende-se que o mesmo é iniciado¹⁷ pela desmontagem do produto em partes menores, que receberão manutenção ou serão alteradas. Após a execução dessas ações nas partes menores, o produto é novamente montado e avaliado. Partindo dessa descrição

---

¹⁷ Em termos de produção.

simples, pode-se afirmar que o projeto de recuperação e modernização deve determinar:

1. Um escopo que discrimine a parte do produto que será alterada dentro de um processo de modernização e a parte que sofrerá manutenção dentro do processo de recuperação.
2. A descrição de uma sequência de desmontagem, que depende, sobretudo, da própria arquitetura do produto. Do mesmo modo, a descrição da sequência de remontagem, atividade inversa.
3. Um conjunto de ações que será destinado a cada parte menor, centrado principalmente na decisão entre recuperação ou modernização.

Devido às suas peculiaridades, a determinação de sequências de desmontagem e da posterior montagem não é abrangida pela metodologia proposta, uma vez que essa sequência é própria de cada produto. A metodologia proposta abrange decisões que estão relacionadas ao escopo de modernização/recuperação e à definição mais precisa do conjunto de ações aplicadas às partes menores do produto.

Evidentemente, a configuração já existente do produto impõe restrições ao projetista de uma modernização. Todos os seus componentes foram projetados e/ou selecionados em razão de decisões de seus projetistas originais para atender necessidades específicas, considerando fatores limitantes, tudo isso numa época passada. Novas soluções significam, na verdade, modificações de algo existente, cujos efeitos podem se alastrar não apenas no produto, mas também em alguns aspectos ligados a este, como operação, logística, manutenção, etc. O sucesso do projeto depende de quanto o projetista compreende o possível efeito das alterações de engenharia e os mantém dentro de um controle satisfatório.

3.1.3 Das alterações de engenharia

Em relação às alterações de engenharia, a Figura 3.1 apresenta a classificação de dois tipos presentes num processo de recuperação e modernização. A primeira refere-se a alterações de engenharia *top-down*, ou seja, impostas de cima para baixo. Tomam-se como exemplo, alterações de engenharia originadas de

mudanças em requisitos ou por solicitação do cliente, que deseja uma nova configuração do produto. O segundo caso são as alterações de engenharia *bottom-up*, surgidas de revisões de projeto, de análises da cadeia logística e até mesmo da verificação de uma oportunidade de melhoria do projeto.

Figura 3.1 - Alterações de engenharia no produto e modernização.

Fonte: autor.

Alterações de engenharia *top-down* são estudadas nas primeiras fases do projeto propriamente dito de recuperação e modernização, encontrando um paralelo com a fase de projeto preliminar de um novo produto. Em geral, possuem considerável influência, praticamente definindo o tipo de trabalho a ser executado. Assim, exigem grande atenção de engenharia, requerendo esforços semelhantes ao de projetar um produto original. Todo este cenário confere às alterações de engenharia *top-down* um papel de grande destaque e atratividade.

Alterações de engenharia *bottom-up* acabam ocorrendo em fases posteriores do projeto propriamente dito, quando é realizado o seu detalhamento. Podem surgir até mesmo contrariando o tipo de trabalho previamente determinado, impondo

mudanças onde se decidira manter a originalidade. Em geral, por serem pontuais e muitas vezes inesperadas, não recebem atenção de engenharia semelhante às alterações de engenharia *top-down*, podendo ocorrer atritos entre as partes interessadas em virtudes de alterações de escopo com impacto em custos.

3.1.4 Da manutenção de componentes

Além de possuir uma fase de desmontagem do produto, a recuperação e modernização diferem-se da fabricação por apresentar em seu contexto diversas ações de manutenção. Há uma porção do produto que é mantida, requerendo cuidados específicos. É preciso definir processos de manutenção e alguns parâmetros para o aproveitamento de componentes. Havendo a reprovação de peças, estas devem ser substituídas, resultando na necessidade do estabelecimento de uma cadeia de suprimento para atender a produção. A possibilidade de aproveitamento de componentes acaba trazendo incertezas ao processo produtivo, uma vez que, em muitos casos, não se sabe antecipadamente a exata proporção de material que será reposta.

3.1.5 Binômio recuperação/modernização

A definição do escopo de trabalho leva ao projetista situações quando é preciso decidir entre manter e reprojetar. Em geral, essa decisão possui importantes consequências em termos de projeto e de produção. O aproveitamento de componentes na manutenção leva a possibilidades de custos menores. Entretanto, como é proposto mais adiante nesta metodologia, expectativas de custos que ultrapassam se somam aos custos de aquisição podem influenciar esse tipo de decisão.

O binômio recuperação/modernização também se manifesta na nova fase de operação do produto. Itens originais possuem informações presumidamente conhecidas, que são obtidas durante a fase de operação anterior. Itens modernizados podem representar novos parâmetros e/ou comportamentos, inserindo incertezas que devem ser observadas pelo projetista. Além disso, a

modernização pode provocar alterações na estrutura de operação, manutenção e suporte do produto.

Um resumo da discussão sobre aspectos da recuperação e modernização de um produto está exposto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Questões sobre recuperação e modernização de um produto.

	Produção	Operação
Recuperação	• Necessidade de testes para possibilitar o aproveitamento de componentes. • Taxa de reposição definida de forma probabilística. • Possibilidade de atrasos na produção em caso de falta de sobressalentes. • Possibilidade de haver excesso de material não utilizado após o término da produção.	• Parâmetros de desempenho, confiabilidade e suporte logístico são conhecidos. • Não há necessidade de mudanças na operação, manutenção e logística. • Aproveitamento e reposição de peças levam à existência de duas populações com idades distintas.
Modernização	• Necessidade de um processo de engenharia (reprojeto) para aprovar a alteração de engenharia. • Reposição de 100% do material pelo novo modelo, independente do estado do primeiro. • Uma alteração num elemento de trabalho pode se propagar para os demais.	• Novos parâmetros de desempenho, confiabilidade e suporte logístico. • Há necessidade de mudanças na operação, manutenção e logística.

Fonte: autor.

3.2 A metodologia proposta

A metodologia proposta está resumida na Figura 3.2, a qual apresenta um fluxograma onde é possível observar sua divisão em seis passos.

Dentro do conceito de que na reengenharia de sistemas é necessário haver uma fase de engenharia reversa para a recuperação do projeto, os dois primeiros passos da metodologia proposta possuem tal objetivo, ao recuperar informações sobre o produto e sobre sua operação. Na visão de gestão de riscos, esses passos tratam do estabelecimento do contexto.

Os dois passos seguintes, passos de projeto (preliminar e detalhado, respectivamente) são fundamentais para a metodologia proposta. No entanto, é importante ressaltar que a metodologia proposta visa auxiliar o projetista. Não se pretende substituir a técnica necessária para a própria execução do projeto, mas apoiar a avaliação de suas consequências em termos de riscos. Aqui se manifestam os processos de avaliação e tratamento de riscos.

Os dois passos seguintes, pertencem à fase de monitoramento dos riscos, observando as decisões tomadas em projeto.

Figura 3.2 - Modelo proposto para o projeto de recuperação e modernização.

Fonte: autor.

3.3 Primeiro passo: análise do produto

O primeiro passo da metodologia proposta é a análise do produto, que é necessária para a obtenção de informações sobre seu projeto original, de forma a

subsidiar o desenvolvimento dos próximos passos, especialmente as decisões que compõem o projeto propriamente dito de recuperação e modernização.

Este primeiro passo é um processo de engenharia reversa que visa à redocumentação do produto e a recuperação do projeto num nível que permita o trabalho dos projetistas da recuperação e modernização.

Em termos de projeto, como explanado na revisão teórica, reengenheirar um sistema requer um processo que, a partir do produto (objeto concreto), recupere um conjunto de informações e de conhecimento, para que decisões sejam tomadas no sentido de se definir um novo produto para concretizá-lo dentro de um processo produtivo. Neste sentido, o processo de engenharia reversa, como exposto por Sage (2009), possui grande importância para o projeto de recuperação e modernização.

A engenharia reversa visa entender e compreender as diversas partes do produto e suas interações entre si, de modo a permitir o prosseguimento do projeto. Entretanto, esta análise pode ultrapassar os limites do produto, procurando suas interações com diversos aspectos, como operação, logística, suprimento de sobressalentes, etc. Sabendo-se que o produto trabalhado vem de uma fase de operação e a ela retornará, possíveis alterações também exercerão influências e mudanças tanto nos atores e processos presentes nesta fase.

Um fato interessante, decorrente da natureza da recuperação e modernização, é observado na qualidade e na extensão do conhecimento necessário para a sua execução. Intuitivamente, realizar apenas a manutenção exige certo conhecimento sobre o produto, mas que não é necessariamente o conhecimento requerido para projetá-lo. Havendo no produto partes que são modernizadas e partes que sofrem manutenção, pode haver áreas e competências com maior ou menor desenvolvimento dentro do projeto, exigindo maior ou menor profundidade de conhecimento.

Resumidamente, não se pretende aqui estabelecer uma regra para a execução da análise do produto, entretanto, é importante que este primeiro e importante passo tenha como resultado dois documentos fundamentais para o prosseguimento do método:

1. Uma lista de materiais, organizada até o último nível de desmontagem do produto, que indica sequências de desmontagem/remontagem e informações sobre números de peças, fornecedores e custos.
2. DSM do produto, ainda que com baixa granularidade, que seja representativa e que permita tomar decisões dentro do projeto preliminar¹⁸.

3.4 Segundo passo: análise da operação do produto

O segundo passo pode ser desenvolvido em paralelo com a análise do produto e visa compreender como o produto é gerenciado em sua vida operacional. A ênfase é recorrer aos procedimentos e métodos previstos para análise RAMS.

Novamente, não se pretende aqui estabelecer uma formatação para este tipo de análise, apenas evidenciar o que se espera como resultado:

1. Um quadro sobre a confiabilidade e manutenibilidade do produto, ou seja, um estudo sobre histórico de falhas, registros de manutenção e toda documentação disponível.
2. Relação de falhas recorrentes e possíveis deficiências de projeto.
3. Estrutura de suporte ao produto, indicando os fornecedores de sobressalentes, histórico de fornecimento e possíveis dificuldades na obtenção dos mesmos.

Este passo e o anterior são, na verdade, processos de aquisição de informações que subsidiam o projetista para as tomadas de decisão.

3.5 Terceiro passo: projeto preliminar

Durante o projeto de recuperação e modernização, é possível que os projetistas tenham de analisar a proposição de uma ou mais alternativas de modernização. São propostas de novas configurações do produto que devem ser avaliadas para se conhecer seus efeitos no projeto original. Dentro de tal análise, se houver mais de uma alternativa proposta, as mesmas devem ser comparadas, para

---

¹⁸ Convém ler adiante, dentro do terceiro passo, a discussão sobre a elaboração da DSM₀.

que se tome uma decisão que defina a configuração final. Como observado na Figura 3.1, este tipo de modernização, que é imposto ao projeto, é denominado nesta obra como alteração de engenharia *top-down*.

Comparando com o processo tradicional de projeto de um novo produto, a análise e a seleção de alternativas de modernização equivalem-se às definições que ocorrem dentro de fases iniciais, dentro do que se denomina projeto preliminar. Obviamente, propor, analisar e selecionar uma alternativa de modernização é um processo menos flexível do que o projeto preliminar de um novo produto. Em outras palavras, as alternativas de modernização são construídas a partir do projeto original cujas características impõem restrições e parâmetros de projeto que devem ser considerados.

O método proposto para o projeto preliminar de recuperação e modernização é baseado na ideia de que toda alternativa de modernização é uma representação do produto, que pode ser dividida em partes ou componentes¹⁹, utilizando-se a ferramenta DSM. Também se considera que uma alternativa possui um perfil de risco que é uma composição dos perfis de risco de todos os seus componentes, que, por sua vez, são obtidos a partir da consideração de falhas durante a operação do produto. O perfil de risco de uma alternativa de modernização pode ser representado por um Número de Prioridade de Risco Global (NPRG), que é uma adaptação do parâmetro NPR, normalmente utilizado em ferramentas de confiabilidade e risco para a classificação de modos de falhas.

3.5.1 Análise do projeto original

Para a avaliação e seleção de alternativas de modernização, é necessário construir uma base a partir do atual estado do produto. As informações obtidas nas análises do produto e da fase de operação podem ser empregadas para a análise da DSM original do produto. No modelo proposto, a configuração original e seus parâmetros passam a ser identificados com o índice zero. Assim, a análise do projeto original visa representar a alternativa A_0 , obtendo-se a DSM_0 , considerando o equilíbrio entre tamanho de matriz e granularidade de forma a permitir o

---

¹⁹ Este texto emprega o termo “componente”.

desdobramento dos trabalhos seguintes. A elaboração da análise da alternativa A_0 segue os seguintes passos, que são exemplificados na Figura 3.3:

1. A DSM_0 é construída a partir da consideração dos quatro tipos de interações entre componentes: física, energética, de massa e informacional. Deve-se salientar que, na construção da DSM_0 , uma célula C_{ij} é representativa das interações do componente i para o componente j . Isto tem como consequência que a DSM pode não ser simétrica.
2. Para cada componente da DSM_0 , é realizada uma análise de severidade máxima, ou seja, o valor de severidade de uma falha catastrófica ou total do componente, de acordo com a Tabela 3.2. Os valores de severidade máxima dos componentes são inseridos numa nova linha na parte inferior da matriz.
3. Para efeito de desenvolvimento da metodologia proposta, as células da diagonal também participam da análise, como se contivessem as “auto interações” do elemento, ou seja, representassem os modos de falha cuja principal causa é originária do próprio elemento ou de um fator externo que não seja de outro componente da DSM /produto.
4. A análise é realizada coluna a coluna, ou seja, são analisadas as contribuições dos componentes interagentes e do próprio componente dentro da coluna. Há uma pequena diferença nas análises:
  - a. Nas células C_{ij} , onde $i \neq j$, as análises são baseadas no HAZOP, tomando-se, como nó-de-estudo, o processo de interação (físico, energético, de massa e informacional) de um componente para o outro²⁰. Assim, recorre-se ao uso de palavras guias, bem como a identificação de causas e consequências. É atribuído um valor para a frequência de ocorrência, conforme a Tabela 3.3. A severidade do modo de falha é parametrizada em relação à severidade máxima do componente. Assim, além da ocorrência, deve ser atribuído um fator de impacto, variando entre zero a um, de acordo com um julgamento relativo entre a falha analisada e a considerada como severidade máxima. Resumindo, para cada célula de interação entre dois

---

²⁰ Atentando para os sentidos dos fluxos, é possível que haja uma interação de A para B e não haja de B para A.

componentes, cada uma de suas quatro divisões²¹, se for o caso, recebe dois valores de análise, ocorrência e fator de impacto, cuja multiplicação é denominada contribuição de risco.

- b. Nas células C_{ij} , onde $i = j$, as análises são baseadas no FMEA, apresentando-se a função do componente, seu principal modo de falha, causas e consequências. Também são atribuídos valores de ocorrência e de fator de impacto²² para a obtenção da contribuição de risco.
5. Em cada coluna, é calculada a soma das contribuições de risco das células e sub-células. Este valor é dividido pela soma dos valores de medida de impacto da mesma coluna, o que resulta numa média ponderada.
6. Para cada componente, a média ponderada das contribuições de risco é multiplicada pelo seu valor de severidade máxima. Esta multiplicação fornece um número de prioridade de risco (NPR) do componente.
7. O NPRG_0 é obtido pela soma de todos os NPR dos componentes.

As operações com as contribuições de riscos de uma coluna para o cálculo do NPR do componente podem ser resumidas pela equação 3.1.

$$\text{NPR}_j = \frac{S_j}{\sum_{k=1}^n \text{FI}_k} (O_1 \times \text{FI}_1 + O_2 \times \text{FI}_2 + \dots + O_n \times \text{FI}_n) \quad (3.1)$$

Onde: j = índice do componente;
 n = quantidade de valores assinalados de contribuições de risco;
 S = severidade máxima do componente;
 O = ocorrência numa determinada interação;
 FI = fator de impacto de uma interação;

²¹ É possível que o analista julgue que um determinado tipo de interação não é significativo para fins de análise. É o caso de interações físicas de um componente para outro consideravelmente maior, cujas variações não provocam consequências importantes. Neste caso, o analista pode desconsiderar a interação. Exemplo: interações de posição e/ou folga entre o escapamento de um veículo para sua carroceria.

²² Nesta análise, busca-se o modo de falha mais característico, que nem sempre é o catastrófico, daí a possibilidade do uso do fator de impacto.

Figura 3.3 - Método proposto para o projeto preliminar.

Passo 1:

	A		B		C		D	
A			F	E			F	
B	F	E						
C							F	I
D	F				F			

A DSM é montada com os quatro tipos de interações

F: Física
E: Energética
M: Massa
I: Informação

Passo 2:

Severidade máxima do componente:	9	8	7	10

As severidades máximas de cada componente são inseridas

Passos 3 e 4:

	A		B		C		D	
A	7		5	3			10	
B	1	1	8					
C					2		8	1
D	2				3		6	

Valores de frequência de ocorrência

	A		B		C		D	
A	1		0,1	0,2			1	
B	1	0,4	0,8					
C					1		0,1	
D	1				0,9		0,6	

Valores do fator de impacto

	A		B		C		D	
A	7		0,5	0,6	0	0	10	0
B	1	0,4	6,4		0	0	0	0
C	0	0	0	0	2		0,8	0
D	2	0	0	0	2,7	0	3,6	

A DSM recebe os valores da multiplicação entre frequência e fator de impacto.

Passos 5 e 6:

Somatório de Ocorrência x Impacto:	10,8	7,6	5,3	14,5
Somatório de Impacto:	3,8	1,2	2	1,8
Média ponderada:	2,84	6,33	2,65	8,06
Severidade máxima do componente	9	8	7	10
NPR dos componentes:	25,58	50,67	18,55	80,56

O NPR de cada componente é obtido a partir da multiplicação da média ponderada e da severidade máxima

Passo 7:

NPRG: 175,35

A soma dos NPR fornece o NPRG

Fonte: autor.

O cálculo do NPRG de uma alternativa pode ser obtido pela equação 3.2.

$$\text{NPRG}_i = \sum_{j=1}^m \text{NPR}_j \quad (3.2)$$

Onde: i = índice da alternativa;
 m = quantidade de componentes;

Tabela 3.2 - Valores de severidade.

<i>EFEITO</i>	<i>CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO</i>	<i>VALOR</i>
Perigoso – sem aviso	Afeta a segurança da operação do produto e/ou envolve o não cumprimento de regulamentação governamental. Ocorrência sem aviso prévio.	10
Perigoso – com aviso	Afeta a segurança da operação do produto e/ou envolve o não cumprimento de regulamentação governamental. Ocorrência com aviso prévio.	9
Muito elevado	Produto inoperante.	8
Elevado	Redução grande no desempenho do produto - operação com restrições sérias	7
Moderado	Redução média no desempenho do produto - operação com restrições	6
Baixo	Redução pequena no desempenho do produto - operação sem restrições	5
Muito baixo	Sem redução no desempenho do produto - afeta seriamente a apresentação/conforto	4
Mínimo	Sem redução no desempenho do produto - afeta a apresentação/conforto	3
Abaixo do mínimo	Sem redução no desempenho do produto - não afeta a apresentação/conforto	2
Nenhum	Nenhum efeito perceptível.	1

Fonte: autor.

Tabela 3.3 - Valores de Ocorrência.

<i>PROBABILIDADE (OCORRÊNCIA)</i>	<i>VALOR</i>
Muito alta: evento é praticamente inevitável.	10
	9
Alta: eventos recorrentes.	8
	7
Moderada: eventos ocasionais.	6
	5
	4
Baixa: evento relativamente pouco frequente.	3
	2
Remota: evento improvável.	1

Fonte: autor.

3.5.2 Análise de alternativas

A DSM_0 é utilizada como base para a investigação das alterações de engenharia propostas e para o cálculo dos perfis de risco de cada alternativa A_i . Para isso, considera-se o caminho de propagação de cada alteração de engenharia dentro de cada alternativa de modernização, o que é feito a partir dos seguintes passos:

1. A DSM_i da alternativa em estudo é criada a partir da DSM_0 , incorporando as alterações, adições e exclusões propostas.
2. Os componentes alterados, adicionados ou excluídos são identificados. É realizada a revisão da severidade máxima do componente.
3. Seleciona-se um componente que foi identificado. Devem ser revisadas tanto as interações que partem do componente (revisões de interações ativas) quanto as que chegam ao componente (revisões de interações passivas). As revisões são comparativas em relação à análise de DSM_0 e visam identificar se há alterações na contribuição de risco das interações.
4. De acordo com as análises sobre as contribuições de risco, as revisões de interações podem indicar a necessidade/possibilidade de reprojeto de um componente anteriormente designado para se manter como original.
5. É possível que surjam novas interações entre componentes. Exemplo: um componente mecânico é reprojeto para incorporar acionamento

pneumático. No caso de novas interações entre componentes, os valores resultantes de novas análises são inseridos, modificando a média ponderada e, por consequência, o NPR do componente. O mesmo raciocínio aplica-se à inclusão de novos componentes.

6. A alteração e/ou a exclusão de um componente pode acabar eliminando interações, sendo necessário um novo cálculo do NPR do componente.
7. Procedem-se os cálculos das fórmulas 3.1 e 3.2 para a alternativa em questão.

3.5.3 Seleção da alternativa de modernização

O cálculo do NPRG pode subsidiar um processo de decisão sobre a seleção da melhor alternativa, considerando os aspectos de desempenho e de custos. Para isso, propõe-se uma adaptação do método proposto por Smaling e De Weck (2007), a partir de duas alterações:

1. O uso do NPRG no lugar do índice de invasão tecnológica, como uma medida relativa do perfil de risco da alternativa em análise.
2. O uso de uma função de desempenho global do produto, modelada por uma distribuição de probabilidade, que é representativa do desempenho esperado do produto, podendo ser entendida como a composição de várias medidas de seu desempenho técnico. Esta função substitui o uso da composição de funções de utilidade, que, no modelo de Smaling e De Weck (2007), possuía a finalidade de transformar as diversas medidas de desempenho técnico em parâmetros adimensionais.

Desta forma, para compor o processo de seleção, emprega-se a função de desempenho global do produto – que é própria de cada alternativa de modernização – considerando a probabilidade de não atingimento de certo desempenho requerido – que é único para todas as alternativas.

O risco de uma alternativa é calculado pela multiplicação do NPRG por essa probabilidade²³, que é expresso pela equação 3.3.

---

²³ Como mencionado, o trabalho de Smaling e De Weck (2007) expressa o risco como uma multiplicação entre o índice de invasão tecnológica e várias funções representativas de valores de

$$\mathfrak{R}_i = \text{NPRG}_i \cdot P(d < d_{\text{alvo}}) \quad (3.3)$$

Para fins de comparação entre alternativas, calcula-se a relação de custo-benefício, que é dada pela fórmula 3.4. A melhor alternativa é aquela que apresenta o menor valor do custo-benefício.

$$\text{Custo-benefício de } A_i = \frac{C_i - C_0}{\mathfrak{R}_0 - \mathfrak{R}_i} \quad (3.4)$$

Onde: C_i = custo da alternativa A_i
 C_0 = custo da alternativa A_0 (recuperação pura do produto original)
 $\mathfrak{R}_i$ = risco da alternativa A_i
 $\mathfrak{R}_0$ = risco da alternativa A_0

3.6 Quarto passo: projeto detalhado

Para que seja proposto um método aplicável ao detalhamento do projeto de recuperação e modernização, pode-se tomar como base uma ideia do processo de produção pelo qual o produto deve passar. A Figura 3.4 representa o processo, a partir de uma desmontagem sucessiva do sistema em subsistemas, partes e componentes e sua remontagem até retornar ao nível sistema, após a realização de um determinado tipo de ação definidora.

Por convenção, neste texto, usa-se o termo elemento de trabalho aplicado ao nível onde se processa esta ação. O elemento de trabalho pode sofrer manutenção, ser reprojetoado, ser excluído, ser inserido ou deliberadamente permanecer fora de escopo – neste caso, nenhuma ação de manutenção é prevista, não há verificação formal de condições de funcionamento e/ou correções. Esta ação pode ser acompanhada de testes e ações complementares, como tratamento superficial, ajustes, verificações, etc. A ideia do elemento de trabalho também tem consequências na formulação da cadeia de suprimento que atende o processo de

---

desempenho, cuja composição e demais cálculos, a rigor, não fazem parte do método. Por simplificação, esta tese opta pelo uso de apenas uma função representativa do desempenho global, a qual supõe-se ser uma distribuição de probabilidade, na tentativa de se modelar certa incerteza sobre o desempenho. Cabe ao aplicador do método a escolha de uma função mais adequada (na verdade, ele pode até mesmo recorrer às funções utilidade). O importante é que o método proposto considera o risco associado ao não atingimento de uma meta, que é imposta. Mais à frente, na aplicação do estudo de caso, é utilizada uma distribuição normal como modelo do desempenho.

recuperação e modernização, uma vez que estoques de sobressalentes podem ser necessários e devem ser devidamente gerenciados.

Figura 3.4 - Processo de recuperação e modernização.

Fonte: autor.

Após a execução das devidas ações no conjunto de elementos de trabalho, o processo segue pela remontagem do produto, mediante uma sequência apropriada. Somente a partir desta fase, o processo de recuperação e modernização passa a ter maior semelhança com a própria fabricação do produto. Assim, elementos de trabalho e subsistemas passam a ser instalados e devidamente testados até a remontagem total.

O método de decisão proposto nesta seção está voltado para a classificação do elemento de trabalho de acordo com a ação prevista dentro do processo de recuperação e modernização. Esta classificação visa detalhar o projeto, determinando o tipo de ação que será aplicada ao elemento, o que acarretará

implicações na determinação de seus sobressalentes, informações que são adicionadas à lista de materiais de recuperação e modernização.

O modelo proposto é uma sucessão de análises específicas que visam classificar os elementos e definir parâmetros necessários para a execução dos trabalhos, como a taxa de reposição e as quantidades necessárias de sobressalentes.

Antes de apresentar o método referente ao projeto detalhado, é importante definir dois importantes fatores empregados:

1. Custos e penalizações²⁴, que são empregados em algumas decisões baseadas em expectativas de custos.
2. Uma proposta de classificação para o elemento de trabalho de acordo com a ação definidora.

3.6.1 Custos e penalizações associados aos elementos de trabalho

A classificação final de elementos depende de certas considerações de custos que são expostas nesta seção. É preciso definir o que é empregado e o que não faz parte dos cálculos que determinam as suas expectativas de custos.

3.6.1.1 Custos que são desprezados no método

A primeira consideração a ser feita é que custos que independem da classificação de tipo de elemento de trabalho são desprezados dentro do processo de decisão para a classificação do mesmo. São exemplos:

1. Custos logísticos de recolhimento e recebimento do produto e posterior expedição e entrega ao cliente final após a recuperação e modernização.
2. Custos do processo de desmontagem até o nível do elemento de trabalho.
3. Custos do processo de remontagem do produto.

---

²⁴ Nesta obra, penalizações diferem de custos por estarem associadas a ocorrência de eventos indesejados – ver seção 3.6.1.3.

4. Custos de testes e avaliações do produto, desde que sejam independentes do elemento, ou seja, não sejam avaliações direcionadas em função da adoção de um tipo de elemento.
5. Custos indiretos, como o custo de manutenção das instalações, que podem ser apropriados ao processo como um todo.

3.6.1.2 Custos que são considerados no método

O primeiro grupo de custos a ser considerado dentro do processo de classificação dos elementos é relativo ao custo de aquisição, compreendendo os valores unitários de cada elemento, mais os eventuais custos associados ao processo de aquisição. Resumidamente, significa o quanto se paga para repor um elemento por um novo.

O segundo grupo de custos é representado pelos custos associados à reparação ou preparação para aproveitamento. O aproveitamento do elemento pode requerer um processo de reparação e/ou de calibração, cujo ônus deve ser considerado. Tomam-se como exemplos o balanceamento de eixos, serviços terceirizados de reparação (retíficas de motores) e processos de preparação superficial. É quanto se paga para reaproveitar o elemento original.

O terceiro grupo é composto pelos custos relativos aos trabalhos de engenharia para o projeto e aprovação da modernização.

3.6.1.3 Penalizações

Além de custos sobre os elementos de trabalhos, o processo de classificação considera penalizações, ou seja, quantificações de custos associados à ocorrência de determinados eventos:

1. Penalizações que incidem durante a fase de produção: são resultantes de erros de previsão da quantidade de material necessário para atender a demanda durante os trabalhos produtivos da recuperação e modernização. São basicamente de três formas:

- a. Penalizações sobre excesso de sobressalentes após a produção, que é uma medida do desperdício de material considerando custos de capital, armazenamento e outros decorrentes do desfazimento dos sobressalentes após a produção. São associados ao excesso da quantidade prevista em relação à demandada.
  - b. Penalizações sobre falta de sobressalentes durante a produção que consideram os custos totais de aquisições emergenciais (podendo haver preços mais elevados), sendo dependentes da diferença entre a quantidade prevista e a demandada.
  - c. Penalizações sobre falta de sobressalentes durante a produção que são decorrentes dos inconvenientes de parada de produção ou de alteração nos procedimentos (adiamento da reposição, reposição por sobressalente reconicionado, etc.). São associados ao evento de falta de material.
2. Penalizações de uma falha do elemento durante a fase de operação: neste sentido, o que se pretende é quantificar tais custos, observando a situação mais desfavorável para a manutenção do elemento de trabalho quando fora do processo de recuperação e modernização. Não se trata apenas de considerar valores de aquisição do sobressalente, mas os custos do trabalho necessário para a correção da falha e também custos resultantes da falha em si, podendo ser adicionados valores de multas, lucros cessantes, indenizações, etc.

3.6.2 classificação proposta dos elementos de trabalho e suas relações de custos

Como definido anteriormente, elemento de trabalho é a peça ou conjunto obtido pelo último nível de desmontagem do produto, na qual se aplica uma ação de manutenção ou reprojeto²⁵ e que assume uma importância para o processo produtivo de recuperação e modernização, uma vez que requer controle de estoque e consumo.

---

²⁵ Existe ainda a possibilidade de o elemento ser definido como fora de escopo, não recebendo nenhuma ação de manutenção, apenas aguardando sua reinstalação.

O projetista da recuperação e modernização deve estabelecer qual ação é imposta ao elemento e todos os parâmetros necessários para sua execução. Uma classificação pode ser proposta a partir de ações possíveis – manutenção, reprojeto, eliminação, inclusão e fora de escopo – e alguns detalhes próprios de cada processo, de tal forma a melhorar a especificação de recuperação e modernização, com desdobramentos no controle de materiais e em aspectos de confiabilidade. A Tabela 3.4 apresenta esta classificação, que, neste modelo, é alvo dos processos decisórios.

Tabela 3.4 - Classificação proposta para elementos. Fonte: autor.

Ação	Classe	Descrição
Manutenção	M0	Elementos simples, não considerados nas análises.
	M1	Reposição mandatória.
	M2	Inspeção + reposição (se necessária).
	M3	Inspeção + reposição ou restauração.
Reprojeto	R0	Elementos simples, não considerados nas análises.
	R1	Evoluído (substituição por outro modelo)
	R2	Modificado após a manutenção.
Fora de escopo	O	Sem ação de manutenção planejada
Inserção	I	Inserido no produto. Acrescenta funções.
Exclusão	E	Excluído do produto. Elimina funções.

Fonte: autor.

Elementos de trabalho que passam pela ação de manutenção possuem um consumo dependente da possibilidade de aproveitamento dos originais. Numa recuperação e modernização, espera-se reaproveitar uma boa parte dos elementos de forma a reduzir custos. Entretanto, ao se pretender renovar o produto, também se espera repor elementos que permitam ao produto atender padrões de qualidade exigidos pelo cliente. Desta forma, o aproveitamento de elementos acaba se tornando uma fonte de tensões e incertezas para a previsão de material necessário para execução dos trabalhos. Além disso, desmontar todos os subsistemas também é uma boa oportunidade para alcançar elementos de difícil acesso e, talvez, pode ser o único momento para fazê-lo, com exceção de ações de manutenção corretiva.

Tal situação permite testar elementos na tentativa de se identificar progressões de falhas.

A classificação de elementos de manutenção proposta na Tabela 3.4 está centrada na ação de manutenção a ser realizada e em termos do controle da taxa de reposição, que é a demanda de um determinado elemento por unidade do produto trabalhado.

Em relação a um elemento que passa por uma ação de reprojeção, esta pode ocorrer basicamente de duas formas. Ele pode ser substituído por outro modelo, como o que acontece quando um veículo é repotencializado a partir da substituição de seu motor original por outro, em geral, mais potente. Pode-se usar este mesmo exemplo para ilustrar a outra forma de ação. Em geral, ao alterar o modelo do motor, são necessárias adaptações em virtude de diferenças na geometria dos dois motores, podendo haver a modificação dos suportes do motor.

3.6.2.1 Elementos M0/R0

Elementos simples de união – parafusos, porcas, arruelas, travas, pinos, etc – são os grandes representantes desta categoria, cuja principal característica é o fato de não haver necessidade de análises mais específicas porque estão fortemente associados a um ou mais elementos de trabalho. Também podem ser classificados como M0: fios, cabos, arames, pequenas tampas.

Se o reprojeção de um elemento de trabalho significar alterações de engenharia em elementos M0 associados a ele, esses novos elementos passam a ser classificados como R0.

3.6.2.2 Elementos M1

Elementos M1 são elementos de trabalho de manutenção cuja reposição é mandatória. Esta classificação pode ser impositiva por uma questão gerencial ou pode ser resultado de um processo de decisão em função de análise de custos.

Sobre a classificação impositiva, há pelo menos três motivos para classificar elementos previamente como M1. Primeiro, existem elementos que são inutilizados durante a desmontagem do produto, como determinadas vedações. Segundo, há elementos previamente decididos para reposição mandatória devido a questões de qualidade, para proporcionar uma “impressão de tão bom como novo”. É o caso de faróis e lâmpadas, cuja luminescência diminui com o tempo e a sua reutilização poderia “denunciar uma baixa qualidade” – um bom exemplo seria um farol mais luminoso do que o outro, a mesma coisa seria um pneu mais desgastado do que os demais. O terceiro motivo para classificação prévia está ligado à política de manutenção periódica que, normalmente estabelece substituição controlada de itens de tempos em tempos. Todos os elementos compreendidos assim poderiam ser repostos, na intenção de se retornar a contagem de tempo uniformemente para zero.

As considerações sobre risco associadas ao elemento levam em conta a probabilidade de falha do mesmo durante um tempo previsto até o descarte do produto ou uma nova recuperação e modernização do mesmo. Dentro das formulações do processo de classificação, este tempo é representado por Tempo de Nova Operação (T_{NOP}).

Assim, para um elemento M1, o custo por unidade pode ser expresso pela equação 3.5.

$$C_{M1} = C + [1 - R(T_{NOP})] \times P_f \quad (3.5)$$

onde,

C_{M1} = custo total de um elemento M1

C = custo unitário de aquisição do elemento

$R(T_{NOP})$ = Confiabilidade em T_{NOP} (Tempo de nova operação)

P_f = penalização por falha durante a operação

3.6.2.3 Elementos M2

Elementos M2 têm apenas um par de alternativas: reusar ou repor. Sua ação de manutenção é bem simples, sendo dependente de algum tipo de inspeção. O binário repor/reusar significa que após a recuperação e modernização do produto, haverá para o elemento de trabalho M2 duas populações: uma com idade

acumulada do tempo de operação anterior e outra, com idade igual a zero. A proporção entre as populações depende da taxa de reposição.

A ação simples de manutenção por reposição de um elemento pode ser representada por um experimento de Bernoulli, uma vez que há dois resultados possíveis: a reposição ou o seu aproveitamento, ou seja, o sucesso ou não do evento utilização do sobressalente.

Desta forma, para a determinação da quantidade de sobressalentes a serem empregados, toma-se a distribuição binomial como modelo matemático, considerando a taxa de reposição como a probabilidade de sucesso. O número de tentativas é a quantidade total de oportunidades de manutenção do elemento, sendo calculada pelo produto da quantidade de unidades trabalhadas do produto pela quantidade do elemento no produto.

Antes de um trabalho de recuperação e modernização, a taxa de reposição é desconhecida e deve ser estimada. Pode-se recorrer a opiniões de especialistas ou usar dados de produções passadas e/ou semelhantes.

As considerações sobre expectativas de custos de um elemento de trabalho M2, durante a produção, podem ser resumidas na equação 3.6.

$$CP_{M2} = q \cdot C + \sum_{x=0}^{q-1} P(x) \cdot [P_{ix} \cdot (q - x)] + \sum_{x=q+1}^N P(x) \cdot \{[P_{il} \cdot (x - q)] + P_{pd}\} \quad (3.6)$$

onde,

CP_{M2} = expectativa de custos totais de produção de um elemento M2

q = quantidade adquirida de sobressalentes do elemento M2

C = custo unitário do elemento de trabalho

$P(x)$ = probabilidade de a produção demandar exatamente x sobressalentes, conforme uma distribuição binomial.

x = variável da quantidade de sobressalentes do elemento de trabalho

P_{ix} = penalização do excesso de sobressalentes após produção

P_{il} = penalização por aquisição emergencial

P_{pd} = penalização por parada de produção

Como mencionado, por hipótese, admite-se que os elementos de trabalho apresentem uma mesma idade quando na recuperação e modernização, representado pelo Tempo de Operação (T_O).

A possibilidade de aproveitamento associada ao elemento de trabalho traz consigo algumas implicações para a fase de operação. Em primeiro lugar, para a população de um determinado elemento, passa a existir duas partições com idades diferentes, ou seja, algumas unidades iniciam a nova fase de operação com tempo igual a zero, outras com tempo igual a T_O . Obviamente, a proporção entre elas depende da taxa de reposição.

Para a partição que foi reusada, a probabilidade de falha é, na verdade, uma probabilidade condicional porque se admite que o elemento ainda não falhou até o tempo T_O , mas pode vir a falhar em T_{NOP} . A confiabilidade neste caso é calculada pela equação 3.7.

$$R(T_{NOP}|\text{sobreviveu } T_O) = \frac{R(T_O + T_{NOP})}{R(T_O)} \quad (3.7)$$

Desta forma, os custos associados à nova fase de operação dependem das duas populações e são expressos pela equação 3.8.

$$CO_{M2} = \{TR \times [1 - R(T_{NOP})] \times P_f\} + \{(1 - TR) \times [1 - R(T_{NOP}|\text{sobreviveu } T_O)] \times P_f\} \quad (3.8)$$

onde,

CO_{M2} = expectativa de custos um elemento M2 durante operação

TR = taxa de reposição

$R(T_{NOP})$ = Confiabilidade em T_{NOP} (Tempo de nova operação)

$R(T_{NOP}|\text{sobreviveu } T_O)$ = Confiabilidade em T_{NOP} , condicional ao aproveitamento

P_f = penalização por falha durante a operação

Os custos totais para um elemento M2 são obtidos pela fórmula 3.9.

$$C_{M2} = \frac{CP_{M2}}{N} + CO_{M2} \quad (3.9)$$

onde,

N = quantidade total de unidades do elemento

3.6.2.4 Elementos M3

Elementos M3 podem ser repostos por novos ou são sujeitos a um processo de restauração ou reparação que visa uma renovação do elemento.

A classificação M3 depende da viabilidade técnica e econômica do processo de reparação e restauração. Questões técnicas são pertinentes ao elemento e dependem de seus modos de falha e da disponibilidade de métodos de correção. Em relação às questões econômicas, há a inclusão de mais um fator de custo, que é referente ao custo de reparo/restauração (C_{Rep}). Este custo é aplicado à parcela que não é repostada, ou seja, pode-se empregar o modelo binomial para calcular a expectativa de custos, que é dada pela equação 3.10

$$\begin{aligned} CT_{Rep} &= \sum_{x=0}^N P(x) \cdot (1 - x) \cdot C_{Rep} = C_{Rep} \cdot \left[\sum_{x=0}^N P(x) - \sum_{x=0}^N P(x) \cdot x \right] \\ &= C_{Rep} \cdot (N - N \cdot TR) = N \cdot [(1 - TR) \cdot C_{Rep}] \end{aligned} \quad (3.10)$$

onde,

CT_{Rep} = expectativa de custos totais de restauração/reparação

N = quantidade total do elemento

C_{Rep} = custo unitário do processo de restauração/reparação

TR = taxa de reposição

$P(x)$ = probabilidade de a produção demandar exatamente x sobressalentes, conforme uma distribuição binomial.

x = variável da quantidade de sobressalentes do elemento de trabalho

Os custos de um elemento de trabalho M3 em relação à produção são expressos pela equação 3.11.

$$CP_{M3} = CT_{Rep} + q \cdot C + \sum_{x=0}^{q-1} P(x) \cdot [P_{ix} \cdot (q - x)] + \sum_{x=q+1}^N P(x) \cdot \{[P_{il} \cdot (x - q)] + P_{pd}\} \quad (3.11)$$

onde,

CT_{Rep} = expectativa de custos totais de restauração/reparação

N = quantidade total do elemento

CP_{M3} = expectativa de custos totais de produção para um elemento M3

q = quantidade adquirida de sobressalentes do elemento

C = custo unitário do elemento de trabalho

$P(x)$ = probabilidade de a produção demandar exatamente x sobressalentes, conforme uma distribuição binomial.

x = variável da quantidade de sobressalentes do elemento de trabalho

P_{ix} = penalização do excesso de sobressalentes após produção

P_{il} = penalização por aquisição emergencial

P_{pd} = penalização por parada de produção

Por hipótese neste presente modelo, admite-se que o processo de reparo ou restauração tem um efeito de renovação uniforme para um dado elemento de trabalho, representado por uma variável α . O valor de α é atribuído ao processo de renovação do elemento, de acordo com Kijima & Sumita (1986).²⁶

A confiabilidade do elemento restaurado pode ser obtida pela expressão dada pela fórmula 3.12.

$$R(T_{NOP}|restaurado) = \frac{R[\alpha \cdot T_O + T_{NOP}]}{R[\alpha \cdot T_O]} \quad (3.12)$$

Desta forma, os custos associados à nova fase de operação dependem das duas populações e são expressos pela equação 3.13.

$$CO_{M3} = \{TR \times [1 - R(T_{NOP})] \times P_f\} + \{(1 - TR) \times [1 - R(T_{NOP}|reparado)] \times P_f\} \quad (3.13)$$

onde,

CO_{M3} = expectativa de custos um elemento M3 durante operação

TR = taxa de reposição

$R(T_{NOP})$ = Confiabilidade em T_{NOP} (Tempo de nova operação)

$R(T_{NOP}|reparado)$ = Confiabilidade em T_{NOP} , condicional ao reparo/restauração

P_f = penalização por falha durante a operação

Os custos totais para um elemento M3 são obtidos pela equação 3.14.

²⁶ Uma renovação perfeita teria $\alpha = 0$, anulando a parcela correspondente a T_o na fórmula 3.12.

$$C_{M3} = \frac{CP_{M3}}{N} + CO_{M3} \quad (3.14)$$

onde,

N = quantidade total do elemento

Ao se confrontar as equações 3.6 e 3.10, é fácil perceber que, se mantidos os mesmos valores de custos e penalizações, pode-se comparar os custos totais unitários das opções M2 e M3 e assim, subsidiar uma decisão. Após algumas manipulações das fórmulas de custos totais, a escolha pela opção M3 é indicada para os seguintes valores do custo unitário de reparo/restauração, apresentados pela equação 3.15.

$$C_{Rep} < P_f \times [R(T_{NOP}|reparado) - R(T_{NOP}|sobreviveu T_o)] \quad (3.15)$$

3.6.2.5 Elementos R1

Elementos de trabalho R1 são aqueles nos quais a peça, conjunto ou subsistema original é substituído por outro modelo (evoluído para um novo modelo). As considerações de custos são semelhantes às dos elementos M1, diferindo apenas pela inclusão de custos de reprojetado, como se observa na equação 3.16.

$$C_{R1} = \left(\frac{CTP}{N} \right) + [1 - R_R(T_{NOP})] \times P_f \quad (3.16)$$

onde,

C_{R1} = custo total de um elemento M1

CTP = custo total do reprojetado (projeto e aprovação do elemento de trabalho)

N = quantidade total do elemento reprojetado

$R_R(T_{NOP})$ = Confiabilidade em T_{NOP} do elemento reprojetado

P_f = penalização por falha durante a operação

3.6.2.6 Elementos R2

A política de peças de reposição da revitalização e modernização para elementos R2 é semelhante ao estabelecido para a classe M2, uma vez que pode

haver o aproveitamento do elemento. A diferença é que a unidade, seja ela nova ou reusada, é submetida a um processo de modificação de suas características, como se observa na equação 3.17.

$$\begin{aligned}
 CP_{R2} = & CTP + q \cdot C + N \cdot C_{mod} + \sum_{x=0}^{q-1} P(x) \cdot [P_{ix} \cdot (q - x)] \\
 & + \sum_{x=q+1}^N P(x) \cdot \{[P_{il} \cdot (x - q)] + P_{pd}\}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

onde,

CP_{R2} = custos de produção de um elemento R2

CTP = custo total do reprojeto (projeto e aprovação do elemento de trabalho)

q = quantidade adquirida de sobressalentes do elemento R2

C = custo unitário do elemento de trabalho

N = quantidade total do elemento

C_{mod} = custo unitário de modificação do elemento de trabalho

$P(x)$ = probabilidade de a produção demandar exatamente x sobressalentes, conforme uma distribuição binomial.

x = variável da quantidade de sobressalentes do elemento de trabalho

P_{ix} = penalização do excesso de sobressalentes após produção

P_{il} = penalização por aquisição emergencial

P_{pd} = penalização por parada de produção

As expectativas de custos associadas à fase de operação também seguem o mesmo padrão dos elementos de trabalhos M2, sendo expressas pela equação 3.18.

$$\begin{aligned}
 CO_{R2} = & \{TR \times [1 - R(T_{NOP})] \times P_f\} \\
 & + \{(1 - TR) \times [1 - R_{mod}(T_{NOP}|\text{sobreviveu } T_0)] \times P_f\}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

onde,

CO_{M2} = expectativa de custos um elemento M2 durante operação

TR = taxa de reposição

$R(T_{NOP})$ = Confiabilidade em T_{NOP} (Tempo de nova operação)

$R_{mod}(T_{NOP}|\text{sobreviveu } T_0)$ = Confiabilidade em T_{NOP} , condicional ao aproveitamento

P_f = penalização por falha durante a operação

Os custos totais para um elemento R2 são obtidos pela fórmula 3.19.

$$C_{R2} = \frac{CP_{R2}}{N} + CO_{R2} \quad (3.19)$$

onde,

N = quantidade total do elemento

3.6.2.7 Elementos fora de escopo

É possível que o escopo da revitalização e modernização de um produto exclua algumas de suas partes em virtudes de decisões acordadas entre as partes interessadas.

Elementos fora de escopo são separados durante o processo de desmontagem, sendo acondicionados para futura instalação. Não sofrem quaisquer ações de manutenção, pois não se exige dos mesmos que estejam funcionando dentro de suas condições normais.

É preciso não confundir elementos fora de escopo com elementos de manutenção com baixa taxa de reposição esperada. Mesmo que se atribua uma taxa de reposição de valor igual ou muito próximo de zero, caso o elemento de manutenção esteja falhado, ele será repostado.

3.6.2.8 Elementos de inserção

Estes elementos são determinados por decisões particulares de projeto. Eles podem estar adicionando novas funcionalidades no produto ou passando a desempenhar funções de elementos existentes que serão excluídos quando não há um simples reprojeto destes. Um exemplo da segunda situação é quando há a mudança de um sistema de freio a tambor para um a disco, pois não se pode falar que o prato e o tambor do freio foram reprojitados para se tornarem pinça e disco de frenagem.

Elementos de inserção no produto têm as mesmas considerações de custos dos elementos R1.

3.6.2.9 Elementos de exclusão

Estes elementos são determinados por decisões particulares de projeto. Suas funções podem ser excluídas do produto ou serem desempenhadas por outros elementos de trabalho. Não há consideração de custos.

3.6.3 Método proposto para o projeto detalhado de recuperação e modernização

O método está representado de forma esquemática pela Figura 3.5. Trata-se de um conjunto de análises mais específicas, que são expostas a seguir. Seu objetivo é a classificação dos elementos de trabalho de forma a compor a documentação técnica para o prosseguimento dos trabalhos, já na fase de produção.

3.6.3.1 Detalhamento do projeto da alternativa selecionada

A partir da própria estrutura do produto, observando o seu processo de desmontagem e posterior montagem, a primeira atividade dentro da presente fase é detalhar o projeto, identificando os elementos de trabalho conforme proposto por esta metodologia.

Assim, o projeto preliminar tem como base a própria lista de materiais do produto, que é trabalhada dentro das análises propostas. Os resultados das análises são inseridos dentro da lista de materiais.

Figura 3.5 - Processo proposto para o projeto detalhado de recuperação e modernização.

Fonte: autor.

3.6.3.2 Análises individuais do elemento

Cada elemento de trabalho é analisado individualmente em relação a três domínios: técnico, de manutenibilidade (durante a fase de operação, ou seja, após ser recuperado e modernizado) e de suporte (também durante a operação).

3.6.3.2.1 Análise técnica do elemento

A análise técnica do elemento resume-se à apreciação do mesmo em relação ao seu projeto. É uma análise particular do elemento, com a possibilidade de uso de uma ampla gama de ferramentas, sem haver um método rigorosamente definido, mas que tem como principal objetivo responder aos seguintes questionamentos: o projeto do elemento é satisfatório? Existem novas tecnologias que poderiam ser empregadas? É possível alterar o projeto de alguns elementos para reduzir o número de componentes?

É fácil perceber que a análise do elemento pode determinar se o mesmo é candidato para alteração de engenharia *bottom-up*. Caso assim seja, o elemento deve ser submetido a análise de reprojeção.

Caso o elemento seja mantido no projeto, a partir de considerações técnicas específicas, ele pode ser:

1. Classificado como elemento M0, devido às razões expostas na descrição dessa classe. Uma vez classificado como M0, o elemento de trabalho não participa das demais análises do modelo.
2. Classificado como M1 sem passar pela análise de expectativas de custos em virtude de características técnicas ou de qualidade, como discutido na definição dessa classificação.
3. Destinado para classificação definitiva do elemento de trabalho em M1, M2 ou M3, de acordo com a análise de expectativa de custos.

3.6.3.2.2 Análise de manutenibilidade

A análise de manutenibilidade²⁷ visa identificar os procedimentos de manutenção que ocorrem durante a fase operacional do produto. São realizados questionamentos da seguinte forma: a manutenção está satisfatória? Caso a manutenção esteja escalonada em níveis de manutenções, esta organização está adequada? Os procedimentos de manutenção estão adequados?

Um exemplo do que se propõe nesta análise é a identificação de determinado procedimento de manutenção preventiva que envolva troca rotineira, previsto para alguns elementos de trabalho. Este procedimento pode indicar a conveniência de uma classificação arbitrária (M1), objetivando proporcionar uma homogeneidade durante a recuperação, fazendo com que a população do elemento de trabalho tenha uma “idade” igual a zero.

---

²⁷ Convém lembrar que se trata de manutenibilidade em relação à fase operacional, sem relação com a manutenção durante a recuperação e modernização.

3.6.3.2.3 Análise de suporte

Uma análise de suporte é procedida com o objetivo de questionar aspectos ligados à disponibilidade e ao fornecimento de sobressalentes durante a operação. São feitos questionamentos do tipo:

1. O fornecimento de sobressalentes está adequado?
2. A quantidade de fornecedores está adequada?
3. O custo por sobressalente está adequado?

Pode-se propor a identificação dos fornecedores e/ou fabricantes, alocando cada um numa coluna a ser inserida dentro da tabela correspondente. Dentro de cada coluna, podem-se empregar os códigos e/ou convenções do fornecedor. Exemplificando, podem ser agrupados kits de um determinado fornecedor, fazendo com que os elementos componentes recebam a mesma classificação.

3.6.3.3 Análise de expectativas de custos

As formulações apresentadas para expectativas de custos nas diversas classificações dos elementos de trabalho subsidiam esta análise, que tem como objetivo auxiliar a tomada de decisão para a classificação final do elemento de trabalho por intermédio da comparação entre alternativas.

Basicamente, dentro da metodologia proposta, a análise de expectativas de custos é realizada para a classificação final dos elementos de trabalho de manutenção e como parte da proposição de reprojeto²⁸.

Uma vez designado que o elemento de trabalho passe por uma ação de manutenção, é necessário estabelecer um valor para sua taxa de reposição, parâmetro fundamental para os cálculos de expectativas de custos. A classificação de manutenção trabalha com a decisão baseada na comparação entre as expectativas de custos totais por unidade do elemento de trabalho, de acordo com as formulações propostas.

---

²⁸ Comparações de expectativas de custos podem ser realizadas nesse sentido.

A taxa de reposição, como observado anteriormente, equivale-se à probabilidade de sucesso de uma distribuição binomial. No início dos trabalhos, pouco se sabe a respeito dessa taxa, porém sua incerteza vai paulatinamente diminuindo, à medida que a produção avança e várias observações vão se acumulando. Este quadro favorece a aplicação de um modelo bayesiano, que pode ser proposto dentro da gestão contínua de riscos durante a fase de produção.

Garthwaite; Kadane; O'Hagan (2005) apresentam uma relação de métodos para a eliciação de uma proporção, que podem ser aplicados para a taxa de reposição no contexto deste trabalho. São métodos que quantificam subjetivamente a opinião de especialistas.

Após definida a taxa de reposição, as equações 3.5 (expectativa de custo total da classificação M1), 3.9 (expectativa de custo total da classificação M2) e 3.13 (expectativa de custo total da classificação M3) podem ser utilizadas para duas finalidades: buscar uma quantidade q que minimize os custos totais das opções M2 e/ou M3²⁹ e calcular o Fator de Atratividade de Reposição Mandatória (*FARM*), definido pela razão entre o custo esperado total de uma opção pela classificação M2 ou M3 e o valor da opção de reposição mandatória (M1) - ver equação 3.20.

$$FARM = \frac{C_{M2}}{C_{M1}} \quad \text{ou} \quad FARM = \frac{C_{M3}}{C_{M1}} \quad (3.20)$$

onde,

C_{M1} = custo total de um elemento M1

C_{M2} = custo total de um elemento M2

C_{M3} = custo total de um elemento M3

Pela própria definição do *FARM*, valores iguais ou maiores do que um significam que a opção M1 oferece os menores custos totais, sendo por isso, mais vantajosa.

À medida que os trabalhos produtivos da recuperação e modernização ocorrem, novas observações são inseridas, permitindo atualizar a própria análise de manutenção e os seus parâmetros de maior importância.

---

²⁹ A opção M3 depende de condições específicas, particulares ao elemento de trabalho.

3.6.3.4 Análise de reprojeto

A análise de reprojeto tem como objetivo identificar os elementos de trabalho que são evoluídos (R1), modificados (R2), inseridos (I) e excluídos (E) e as consequências dessas alterações de engenharia nos demais elementos de trabalho. Ela está centrada na análise pontual de riscos e de alteração de engenharia, que é realizada várias vezes dentro do roteiro da análise de reprojeto. A análise de reprojeto está baseada em três premissas:

1. Todo elemento de trabalho de reprojeto ou inserido deve ser projetado corretamente, conforme as técnicas necessárias para isso. O método proposto não substitui essas técnicas.
2. Todas as relações de dependências entre elementos, no projeto original, a princípio estão resolvidas em termos de projeto e apresentam perfil de risco aceitável, a menos que algum tipo de deficiência seja identificada durante as análises anteriores, o que faria do elemento um candidato ao reprojeto.
3. Toda alteração de engenharia em um elemento de trabalho significa a possibilidade de modificação nas suas relações de dependências. Estas devem obrigatoriamente ser examinadas em termos de projeto e de perfil de risco, fins serem aceitas ou não, o que pode representar a propagação das alterações de engenharia.

A análise é realizada por meio de uma DSM de produto para estabelecer ligações entre os elementos dentro de um escopo de análise. Este escopo é definido de acordo com as particularidades do produto, podendo abranger um conjunto, subsistema ou composição de subsistemas. A DSM está centrada em dois objetivos principais:

1. Identificar dependências entre elementos, informação que será empregada numa possível análise de reprojeto, por meio da apreciação da propagação de alterações de engenharia.

2. Identificar *clusters* ou agrupamentos de componentes, o que além de subsidiar a análise de reprojeto, permite a adoção de soluções comuns em vários elementos. Exemplo: quando um elemento é proposto para erprojeto, pode-se estudar estendê-la a outros elementos que possuam características comuns.

3.6.3.4.1 Montagem da DSM: identificação de dependências entre elementos

A DSM³⁰ é desenvolvida a partir das dependências entre dois componentes (elementos), utilizando-se uma escala apropriada para esta quantificação. A matriz não é necessariamente simétrica e os valores atribuídos seguem a seguinte convenção:

- Grau 4 – Dependência total: o elemento B é totalmente projetado em função do projeto do elemento A.
- Grau 3 – Dependência local: parte do projeto do elemento B é influenciada pelo projeto do elemento A, ou seja, há uma influência local/pontual. Como exemplo, podem-se observar itens que são instalados na carroceria de um veículo. O projeto da carroceria pode ser influenciado localmente por causa de um item.
- Grau 2 – Interação em estado normal: o elemento B possui algum tipo de interação com A, sem possuir uma dependência ou influência de projeto. Elementos podem possuir interações físicas e/ou energéticas em virtude de sua proximidade.
- Grau 1 – Interação possível e relevante: é importante considerar uma possível interação entre dois elementos, mesmo não sendo adjacentes. A finalidade deste grau é prover ao analista a possibilidade de registrar resultados de análises de falhas que estejam além das interações normais, como é o caso dos efeitos da elevação de temperatura em componentes sensíveis provocada por uma falha no motor.

---

³⁰ Nesta análise, a DSM representa as dependências de projeto, que são indicadas nas células fora da diagonal. Não confundir com a DSM empregada no projeto preliminar, que representa os quatro tipos de interações em partições de células. Conceitualmente, onde há dependência, há pelo menos um tipo de interação.

3.6.3.4.2 Roteiro da análise de reprojeto nas dependências

A análise de reprojeto é realizada nas relações de dependências dos elementos de trabalho que são reprojetados, inseridos ou excluídos, de acordo com o seguinte roteiro:

1. Identificar a relação de dependência, observando o grau atribuído.
2. Verificar se a alteração de engenharia proposta significa alteração no grau da dependência. Caso positivo, atualizar a lista de materiais.
3. Verificar se o projeto está resolvido entre os dois elementos de trabalho, de acordo com o grau atual de dependência. Esta verificação é técnica e específica, não sendo detalhada neste modelo. Caso contrário, será necessário reprojetar um ou os dois elementos.
4. Verificar o perfil de risco associado com as interações entre elementos, que podem ser de quatro tipos: física, energética, de material e de informação.
5. Verificar se o perfil de risco é menor do que o original ou se é pelo menos aceitável. Caso contrário, será necessário adotar medidas para sua diminuição, podendo significar o reprojeto de um ou dos dois elementos.

3.6.3.5 Encerramento do projeto detalhado: definição do projeto de recuperação e modernização

Após todas as análises realizadas, o projeto detalhado de recuperação e modernização tem como base uma lista de material atualizada, contendo informações sobre projeto, dependências, classificação dos elementos de trabalho, quantidades previstas para utilização durante a fase de produção e informações sobre confiabilidade e risco associadas à fase de operação. Desta forma, a lista de materiais também passa a ser uma base para os trabalhos a serem realizados nos dois próximos passos da metodologia proposta, que são discutidos brevemente nas próximas seções.

3.7 Quinto passo: gestão contínua de riscos durante produção

Em relação à parte do produto submetida à recuperação, pode-se afirmar que muitas decisões foram tomadas considerando incertezas, principalmente na questão da taxa de reposição. Tais decisões estabeleceram não apenas uma classificação, mas uma previsão de consumo de material. Naturalmente, durante a fase de produção, as decisões podem ser revisadas a partir de evidências observadas, o que permite novas previsões de quantidades e até mesmo uma reclassificação do elemento de trabalho.

Desta forma, espera-se que numa gestão contínua de riscos durante a produção, haja revisões das classificações de manutenção, atualizando-se a lista de materiais.

3.8 Sexto passo: gestão de ativos na nova fase de operação

Quando um produto retorna à operação após passar por um processo de recuperação e modernização, ele leva consigo um quadro derivado de sua condição de ser uma mistura do novo com o antigo.

Novas expectativas são comuns a um produto modernizado, face às suas alterações de engenharia, especialmente se relacionadas à correção e/ou melhoramento de seu desempenho. Mesmo um produto apenas recuperado possui a expectativa de ser “tão bom como se novo fosse”, em virtude da dimensão dos trabalhos.

Uma decorrência evidente de um processo de recuperação e modernização baseado em gestão de riscos, que se apoia na revisão e coleta de informações, é a consolidação de uma base de dados mais atualizada e, de certa forma, até mais vantajosa do que a de um produto novo. Trata-se de uma grande revisão das informações sobre o produto, o que muito facilita a gestão futura do mesmo.

Mesmo não podendo se apresentar de forma prescritiva dentro deste modelo, o estabelecimento de um sistema de gestão de ativos é oportuno devido às razões apontadas no parágrafo anterior, motivadas pelo interesse numa melhor gestão do

produto. Entretanto, tal prática depende de ações institucionais, muitas vezes fora do alcance do projetista.

3.9 Considerações Finais: análise da metodologia proposta e de suas contribuições

A metodologia proposta caracteriza-se pela predominância dos passos referentes às principais decisões de projeto. Neste sentido, os dois primeiros passos, que são de análises do produto e de sua operação prévia, são etapas de obtenção das informações necessárias para os dois passos seguintes.

A proposta do método para o projeto preliminar (terceiro passo), cujas decisões são mais amplas e mais influentes dentro do projeto de recuperação e modernização, é baseada no emprego da ferramenta DSM como meio auxiliar para a quantificação do risco dentro do processo de seleção de alternativas, a partir do uso das quatro interações propostas por Pimmier e Eppinger (1994). Como mencionado anteriormente, essa proposta é baseada nos trabalhos de Smaling e De Weck (2007) e de Browning (2002). A contribuição da metodologia proposta é a utilização de técnicas de análise de riscos (HAZOP e FMEA) dentro do processo de quantificação de um índice de risco em substituição ao índice de invasão tecnológica utilizado por aqueles autores.

Já em relação ao projeto detalhado (quarto passo), este também faz uso da técnica DSM, porém de uma forma diferente do proposto dentro do projeto preliminar. A DSM é empregada de maneira mais simplificada, no intuito de identificar possíveis consequências de alterações de engenharia, a partir do conceito de propagação apresentado por Eckert et al. (2004). O método aqui também emprega análises de riscos (na avaliação das próprias alterações de engenharia), porém estas são executadas individualmente, sem a pretensão de se constituir um índice relacionado à composição de elementos. Em suma, o papel da DSM no projeto detalhado é de organizar as análises dentro de um procedimento metódico.

Outro aspecto importante do projeto detalhado está relacionado às análises de expectativas de custos, mais pertinentes à decisão sobre elementos de manutenção. Neste caso, o emprego de análises de riscos é ligado à quantificação de valores de expectativas de custos considerando eventos indesejáveis na produção (erros de previsão de quantidades) e na operação (falha do elemento). Trata-se de uma evolução do método simples de se calcular probabilidades a partir de uma distribuição binomial dentro de um modelo de gestão de materiais. Sua principal característica é somar as expectativas de custos durante a fase operacional, o que pode levar à decisão de reposições mandatórias (classificação M1).

Os passos de gestão contínua de riscos (quinto e sexto passos) são consequências da análise realizada no desenvolvimento do projeto. Durante a produção, as decisões do projeto detalhado podem ser revistas, principalmente as previsões de quantidades. Já na fase de operação, os resultados das análises de riscos são empregados como base para a gestão do produto.

4 Aplicação dos métodos propostos em processos de recuperação e modernização de viaturas blindadas sobre rodas

O presente capítulo tem por objetivo descrever a aplicação do método dentro de projetos de recuperação e modernização executados pelo Exército Brasileiro. Inicialmente, para ambientação do leitor, uma breve exposição sobre os trabalhos executados nesses projetos é feita. A seguir, algumas considerações sobre o estudo de caso são apresentadas. A descrição do estudo de caso é feita por meio de dois grandes blocos. O capítulo finaliza-se com a apresentação de discussões específicas.

4.1 Recuperação e modernização de viaturas blindadas no Brasil e a motivação desta obra

De acordo com Bastos (2012), a história da recuperação e modernização de veículos militares no Brasil iniciou-se em 1967, quando foi criado no Parque Regional de Motomecanização da Segunda Região Militar (São Paulo) (PqRMM/2), um grupo de trabalho, constituído por vários oficiais engenheiros mecânicos, que iniciou a adaptação de motores e outros componentes em veículos militares. O primeiro grande sucesso do Parque em termos de recuperação e modernização foram os trabalhos no carro de reconhecimento M-8 *Greyhound*, de fabricação norte-americana. O velho combatente³¹ teve seu motor a gasolina substituído pelo OM-321 (Mercedes-Benz) a diesel.

Aquela experiência na recuperação e modernização de viaturas blindadas permitiu ao grupo de trabalho desenvolver uma viatura blindada de reconhecimento 6x6. Para o projeto da suspensão do veículo, foi adotado o recém-criado sistema “*boomerang*” desenvolvido por uma empresa denominada Engesa. Com o prosseguimento do projeto, rebatizado de Carro de Reconhecimento sobre Rodas (CRR), foi assinado uma carta-contrato entre a Diretoria de Pesquisa e Ensino Técnico do Exército e a Engesa (Engenheiros Especializados S/A). O CRR foi aperfeiçoado e rebatizado como EE-9 Cascavel. A Engesa passou então a fabricar e

---

³¹ A Força Expedicionária Brasileira (FEB) operou algumas unidades do modelo na Segunda Grande Guerra

vender este carro, símbolo maior do sucesso da indústria bélica brasileira, (BASTOS, 2012).

4.1.1 Os veículos Engesa e o EE-11 Urutu, que serve como estudo de caso nesta obra

A Engesa desenvolveu e produziu uma grande gama de produtos, desde veículos blindados até caminhões e tratores de uso civil. Dois desses produtos são extensamente empregados até os dias atuais: as viaturas blindadas de rodas EE-9 Cascavel e EE-11 Urutu.

Figura 4.1 - Viatura Blindada de Reconhecimento EE-9 Cascavel.

Fonte: Material de propaganda da Engesa.

O EE-9 Cascavel, apresentado na Figura 4.1, é uma viatura blindada de reconhecimento (VBR). Sua missão basicamente é tentar estabelecer contato com tropas inimigas sem, no entanto, permanecer muito tempo em combate. Por isso, o EE-9 Cascavel possui uma blindagem leve, pouco resistente em comparação com veículos de combate. Sua ênfase está na velocidade, uma vez que pode ultrapassar 90 km/h. O EE-9 Cascavel está equipado com um canhão de 90 mm, instalado numa torre de acionamento manual. Três homens formam a sua guarnição –

motorista, atirador e comandante do carro. Seu peso em ordem de combate é de 13 toneladas.

O EE-9 Cascavel foi produzido nas décadas de 70 e 80. A Engesa usava uma denominação baseada em modelo e série. Em geral, quando a Engesa introduzia grandes alterações no projeto, ela lançava um novo modelo. As séries diferem entre si de acordo com aplicação ou por uma determinada customização. Desta forma, para o Exército Brasileiro, o EE-9 Cascavel foi disponibilizado nos seguintes modelos: antigo (MII), intermediário (MVI) e moderno (MVII). A Tabela 4.1 apresenta, de forma resumida, alguns detalhes das diferenças entre modelos e quantidades aproximadas pertencentes ao Exército Brasileiro.

Tabela 4.1 - Dados sobre os diversos modelos do EE-9 Cascavel e EE-11 Urutu.

Modelo	Caraterísticas	Quantidades	
		EE-9	EE-11
Antigo EE-9 MII EE-11 MII	Motor OM-352 A (156cv e 44 kgfm) Câmbio manual (EE-9: Clarck/EE-11: MBB) Embreagem mecânica Freio a tambor Dupla voltagem 12/24 volts Fabricação 1974-1981	157	155
Intermediário EE-9 MVI EE-11 MV	Motor OM-352 A (172cv e 55 kgfm) Caixa automática Allison AT 545 Freio a disco Voltagem única 24 volts Fabricação 1982 80 % similar ao Moderno	37	20
Moderno EE-9 MVII EE-11 MVI	Motor OM-352 A (172cv e 55 kgfm) Caixa automática Allison MT-643 Fabricação 1983-1988 Abrangido pelo Programa de Revitalização AGSP	213	51

Fonte: Soares (2012).

O EE-11 Urutu, por sua vez, é uma viatura blindada de transporte de pessoal³². A missão do EE-11 Urutu é transportar soldados até o combate. O EE-11 Urutu, vide Figura 4.2, também possui blindagem leve e grande mobilidade, além de ter capacidade anfíbia. O carro apresenta um peso de 14 toneladas em ordem de

³² Na verdade, o EE-11 Urutu possui também versões de carro oficina, carro comando, lança-morteiro, ambulância e uma versão de reconhecimento, a qual está equipada com a mesma torre com canhão do EE-9 Cascavel. Para fins de simplificação, neste texto, apenas a versão de transporte de pessoal é analisada.

combate e possui mecânica similar ao EE-9 Cascavel. Equipado com uma metralhadora Browning .50, o EE-11 Urutu possui uma guarnição de quatro militares para conduzir uma tropa de dez fuzileiros. Diversos modelos e séries foram fabricados tanto para o Exército Brasileiro quanto para exportação. Em relação aos modelos adotados pelo Exército Brasileiro, tem-se: antigo (MII), intermediário (MV) e moderno (MVI). As informações sobre modelos do Urutu também estão resumidas na Tabela 4.1.

Figura 4.2 - Viatura Blindada de Transporte de Pessoal EE-11 Urutu.

Fonte: AGSP.

4.1.2 Recuperação e modernização dos veículos Engesa

Com o fim da Engesa no começo dos anos 90, o Exército Brasileiro passou a se preocupar com o futuro de sua frota de viaturas blindadas Urutu e Cascavel, cuja indisponibilidade crescia em decorrência de falta de suprimento e principalmente da ausência do fabricante. Em 1996, a então Diretoria de Recuperação criou uma comissão denominada Grupo de Trabalho – Viabilidade Técnica da Modernização

do Urutu e do Cascavel (GT-VTMUC), (BARBOSA, 2005). Essa comissão realizou um Estudo de Viabilidade Técnica-Econômica, que apresentou como solução a padronização dos modelos. Entende-se a padronização como uma modernização que seria imposta a todos os modelos dos carros, de forma que apresentassem um grau elevado de componentes similares.

Uma licitação para o projeto de padronização foi realizada no final da década de 90. A empresa vencedora do certame deveria entregar um projeto e dois protótipos trabalhados nos veículos Urutu e Cascavel dos modelos mais antigos.

A padronização propôs grandes alterações de engenharia: um novo motor (foi escolhido o OM-366) e seus agregados, a adoção de caixa de mudanças automática em todos os modelos, melhoramentos pontuais no trem de força e a padronização das torretas³³ do sistema de armamento. Os protótipos foram produzidos e entregues em 1998, mas apresentaram diversos problemas durante a fase de avaliação, com episódios de sobreaquecimento e quebra de componentes da tração dianteira.

4.1.3 O projeto Fênix e seus desdobramentos

Devido ao elevado custo da padronização e em face de problemas técnicos apresentados, o Estado-Maior do Exército decidiu abandonar a ideia de modernizar os modelos mais antigos, porém autorizou a recuperação das viaturas mais modernas (EE-9 Cascavel modelo VII série 9 e EE-11 Urutu modelo VI série 4), no sentido de proporcionar uma sobrevida de quinze anos às mesmas. A decisão de recuperar os modelos mais novos levou em consideração o fato de que tais modelos teriam um processo de recuperação mais simples e menos oneroso e que não exigiriam um projeto de modernização.

A produção do Projeto Fênix iniciou-se, de fato, no final do ano 2000, com o recebimento das primeiras viaturas e com a realização dos primeiros processos

---

³³ Trata-se de uma pequena torre, que permite ao operador girá-la em 360°, com o objetivo de operar um armamento.

licitatórios (aquisição de peças de reposição e contratação de serviços³⁴). Também conhecido por Programa de Revitalização de Viaturas de Rodas Urutu e Cascavel, o Projeto Fênix trabalhou mais de duas centenas de veículos.

Em suma, o projeto Fênix refere-se à recuperação de viaturas blindadas sobre rodas, com baixo nível de modernização.

Um dos principais problemas apontados por Souza (2012), que avaliou o Projeto Fênix sob a óptica da logística, está na criticidade da gestão de suprimento, fortemente influenciado pela legislação brasileira sobre licitações. Agravava-se pelo fato de que a demanda por peças de reposição ser escalonada por vários níveis de mortalidade (ou taxa de reposição³⁵). O formato burocratizado da previsão de verbas limitava a aquisição de suprimento para a produção, o que reduzia a margem de manobra da gestão de peças e impedia aquisições antecipadas (redução de custos devido a maiores quantidades).

Para se compreender o problema das peças de reposição, pode-se recorrer a uma breve análise. Numa amostragem de 48 viaturas EE-9 Cascavel, foram realizados 3.818 pedidos, envolvendo 2.647 itens. O Gráfico 4.1 representa a distribuição das taxas de reposição calculadas com base nesta amostra. Como se pode ver, há uma predominância de elementos com baixas taxas de reposição, o que representa incertezas na previsão de peças.

Em relação ao orçamento dos trabalhos, ao longo do tempo, houve um considerável aumento do custo por viatura: 87,5% (SOARES, 2012). Um documento do início do Projeto Fênix atribuiu o aumento do custo a erros de previsão de reposição de peças e a alterações de escopo de trabalhos.

---

³⁴ O Projeto Fênix trabalhava com mão-de-obra militar e civil, contratada para realização de serviços de manutenção em diversos subsistemas do veículo. Cabia à administração militar a aquisição de sobressalentes. Em 2012, houve uma reestruturação desse modelo.

³⁵ Mais à frente, no capítulo 3, que é a proposição do método central desta tese, a taxa de reposição será definida como uma proporção dada pela quantidade reposta de unidades de um determinado elemento em relação ao total de unidades deste elemento. O termo “mortalidade” é um jargão pouco preciso, uma vez que, durante os trabalhos de recuperação e modernização, pode-se trocar um componente ainda não falhado ou “morto”.

Gráfico 4.1 - Distribuição de itens em relação a taxa de reposição.

Fonte: autor.

4.1.4 A necessidade de modernização do EE-11 Urutu MII

Como mencionado, o Projeto Fênix não abrangia as viaturas dos modelos mais antigos. Estas viaturas, em especial o EE-11 Urutu MII, foram assuntos de diversos estudos e discussões ao longo do tempo. O EE-11 Urutu mereceu destaque porque há uma quantidade relativamente “pequena” de unidades na versão mais moderna, enquanto há aproximadamente o triplo em unidades de outras versões. O agravante dessa situação é o seu uso bastante intenso, por sua característica de transporte de pessoal.

Algumas tentativas de recuperação e modernização, tanto do EE-11 Urutu como do EE-9 Cascavel foram desenvolvidas dentro e fora do Arsenal de Guerra de São Paulo, o que constitui um valioso acervo para o estudo que norteia esta tese. De fato, as aplicações do estudo de caso apoiam-se em protótipos projetados e testados pela Organização Militar. São trabalhos conduzidos em parceria com empresas contratadas. Por motivos éticos, este trabalho mantém sigilo sobre o nome e a participação das empresas nos protótipos analisados, limitando-se em descrever suas configurações. De maneira alguma pretende-se criticar o trabalho e a competência das mesmas.

4.2 Sobre a aplicação da metodologia proposta

O capítulo terceiro desta obra destinou-se a propor um método em seis passos para projetos de recuperação e modernização de produtos. Este método é bem abrangente, no sentido de abarcar diversas fases do projeto e produção. Esta característica dificulta a sua aplicação num estudo de caso em sua totalidade, principalmente se for considerado o tempo de desenvolvimento de um projeto deste tipo.

Para se contornar tal dificuldade, optou-se, nesta tese, por uma estratégia de aplicação seletiva de partes do método direcionada para onde houver melhores condições de implantação e validação.

Os dois primeiros passos são análises que visam subsidiar os passos seguintes com informações necessárias para tomadas de decisão. Não há prescrição de uma metodologia rigorosa, sendo desnecessário dedicar uma aplicação específica para uma validação.

O terceiro e o quarto passos são o verdadeiro cerne do método, contendo processos de tomadas de decisão que precisam ser aplicados para sua validação. Entretanto, repetem-se para estes passos as mesmas dificuldades do método completo: uma grande abrangência, que se desdobra nas duas fases do projeto. Assim, seguindo a estratégia de aplicação seletiva, estes passos são desdobrados nos dois estudos de caso:

1. O de um projeto preliminar (terceiro passo), que compreende a seleção de alternativas de modernização. Sua aplicação em caso exemplo compreende a seleção de uma melhor alternativa entre três configurações de modernização. A Organização Militar já trabalhou com as três configurações até a produção de protótipos que foram avaliados de acordo com seus processos de teste e aprovação.
2. O projeto detalhado (quarto passo), cuja aplicação restringe-se a parte do subsistema do eixo dianteiro (incluindo os elementos de frenagem), por este receber alterações de engenharia *top-down* e também por apresentar uma boa diversidade de elementos para as análises. Outra vantagem desta

seleção é a possibilidade de aproveitamento de dados históricos da produção da recuperação tanto do EE-11 Urutu quanto do EE-9 Cascavel, pois os subsistemas são similares.

O quinto passo, centrado no gerenciamento de riscos durante a fase de produção pode ser ilustrado pelo modelo de atualização bayesiana da taxa de reposição, que é aplicado como uma das possibilidades a ser adotada dentro da análise de expectativas de custos, que faz parte do projeto detalhado (terceiro passo).

Os resultados das análises anteriores também podem servir como base para a execução do sexto passo (gestão de riscos durante a operação). Entretanto, esta aplicação não pode ser demonstrada nesta tese em virtude de limitações de tempo.

4.3 Estudo de caso sobre projeto preliminar

A aplicação em caso exemplo para o projeto preliminar pode aproveitar os diversos trabalhos realizados em relação ao EE-11 Urutu MII. Como já mencionado, este carro é uma das versões mais antigas da viatura, apresentando diversas características que foram modificadas em novas versões posteriores pela própria empresa fabricante. A Tabela 4.2 resume as principais características da versão original e das várias alternativas que são tratadas neste caso exemplo.

Basicamente, são analisadas três alternativas de projeto, cujas características são baseadas em três modelos que realmente foram produzidos na Organização Militar. O intuito desta aplicação em caso exemplo é aproveitar dados coletados pela avaliação dos veículos, que normalmente ocorre após a produção.

Tabela 4.2 - Características técnicas das alternativas de configuração do EE-11 Urutu MII.

	<i>Original</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
Motor	Mercedes-Benz OM 352 A Potência Máxima de 156 cv à 2800 rpm e Torque Máximo de 44 kgfm à 1800 rpm	Original.	Original.	Mercedes-Benz OM 366 LA Potência Máxima de 211 cv à 2600 rpm e Torque Máximo de 67 kgfm à 1400 rpm

(Continua)

	<i>Original</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
Caixa de mudanças	Manual; Fabricante: Mercedes-Benz; Modelo: G3-36.	Original.	Original.	Allison MT 643. A mesma caixa do modelo EE-11 Urutu MVI
Caixa de transferência	Duas velocidades, com engrenagens com módulo 3,80.	Original.	Original.	Duas velocidades, com engrenagens com módulo 5,25.
Freio de serviço	À tambor nas seis rodas. Acionamento: hidráulico com servo assistência a ar comprimido; Cilindro Mestre: com uma saída para as rodas dianteiras, e uma saída para as rodas intermediárias e traseiras.	Original	À disco nas seis rodas; Acionamento: hidráulico com servo assistência a ar comprimido; Cilindro Mestre: com uma saída para as rodas dianteiras, e com dupla saída para as rodas intermediárias e traseiras.	À disco nas seis rodas; Acionamento: hidráulico com servo assistência a ar comprimido; Cilindro Mestre: com uma saída para as rodas dianteiras, e com dupla saída para as rodas intermediárias e traseiras.
Freio de estacionamento	Tipo: à tambor atuando na árvore primária da caixa de transferência; Acionamento: mecânico; Área de atrito: 246 cm².	Original	Original	À tambor, atuando na caixa de mudanças
Sistema elétrico	Dois circuitos: 12V para a plataforma veicular e 24V para o sistema de comunicações	Circuito único de 24V.	Circuito único de 24V.	Circuito único de 24V.
Sistema pneumático	Automotivo convencional. Uso de comandos eletropneumáticos.	Automotivo convencional. Uso de comandos pneumáticos.	Automotivo convencional. Uso de comandos pneumáticos.	Automotivo convencional. Uso de comandos pneumáticos.
Bomba de porão	Acionamento por correias a partir da caixa de transferência.	Acionamento elétrico.	Acionamento elétrico.	Acionamento elétrico.
Para-brisas	Não existe.	Não existe.	Retrátil.	Retrátil.
CTIS (<i>Central Tire Inflate System</i> – controle de enchimento de pneus)	Não existe.	Não existe.	Existente. Aproveita novo modelo de cubo de rodas.	Existente. Aproveita novo modelo de cubo de rodas.

(Continuação)

	<i>Original</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
Porta traseira	Manual.	Original	Acionamento pneumático.	Acionamento pneumático.
Ar condicionado	Não existe.	Não existe.	Não existe.	
Trabalho de referência				
Custo*	200	350	400	500
				(Conclusão)

*Valores de referência³⁶

Fonte: autor.

4.3.1 Análise do projeto original

O EE-11 Urutu MII possui grande tempo de operação do Exército Brasileiro. No entanto, o veículo tem um emprego muito irregular, com baixa quilometragem anual e longos intervalos de não utilização. As apreciações desta análise foram realizadas por uma equipe de projeto, a qual dispunha de informações essencialmente qualitativas sobre o veículo.

A análise do projeto original foi baseada na DSM₀ com 38 componentes, que compreendem a própria divisão do veículo em subsistemas proposta pelo fabricante com alguns detalhamentos em subsistemas de maior interesse – como é o caso do freio, que foi subdividido em controle e em suas partes dianteira e traseira³⁷. Um importante detalhe na construção da DSM₀ é a preocupação em já discriminar como componentes desta matriz os itens propostos para modernização em quaisquer alternativas – é o caso do para-brisa e da porta traseira. O Apêndice A traz um conjunto de figuras que ilustram os componentes da análise, além de apresentar uma breve descrição funcional destes.

³⁶ Os custos apresentados são baseados nas próprias estimativas da Organização Militar. A fórmula de cálculo é simples. Divide-se a viatura em vários componentes (no caso, os mesmos componentes da DSM). Cada componente pode ser modernizado ou mantido. Se for mantido, o custo do componente é baseado no valor médio em peças e serviços do componente equivalente de uma produção que apresenta um bom histórico (No caso, empregou-se dados da recuperação do Urutu de versão mais moderna). Se for modernizado, o valor é o do novo componente. Além do somatório de custos individualizados, a Organização Militar considera custos de insumos, mão-de-obra, transporte e, no caso de modernização, os custos de um projeto. Finalizando, é importante mencionar que são estimativas empregadas em processos decisórios. Após a definição de uma linha de ação, os valores são revisados para seu uso como valores de referências de um processo licitatório.

³⁷ Esta divisão em dianteiro e traseiro levou em conta a configuração nestes dois circuitos, presente nos modelos mais modernos do veículo.

As análises de risco foram executadas na DSM₀, a qual está apresentada no Apêndice B. Ao todo foram realizadas 304 análises (266 análises de interações entre componentes). Das análises de interações, 71 foram desprezadas, pois se tratavam de interações sem consequências relevantes.

Devido à grande quantidade de análises, bem como a necessidade de aproveitamento de dados para o prosseguimento da metodologia, foi criado um banco de dados ad hoc em Access®. A construção das DSM exigiu a elaboração de uma rotina em PHP.

As análises de risco realizadas dependem da atribuição dos valores para a severidade máxima de cada componente e, dentro das células da DSM, dos valores de ocorrência e de fator de impacto. A severidade máxima de cada componente levou em consideração os efeitos de uma falha total do mesmo em relação ao desempenho do veículo como um todo. Os valores atribuídos para as ponderações dentro das células levaram em conta avaliações dos integrantes da equipe de projeto. Todas quantificações foram baseadas nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Um quadro esquemático dos valores de NPR dos componentes da alternativa A₀ e das demais alternativas da análise encontra-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores de NPR de componentes das alternativas.

Componente	A0	A1	A2	A3
Motor	25,78	25,78	25,78	24,00
Suporte do motor	12,92	12,92	12,92	17,85
Admissão de ar	26,29	26,29	26,29	27,43
Admissão de combustível	22,40	22,40	22,40	23,20
Escapamento	11,15	11,15	11,15	11,15
Ventilador	33,33	33,33	33,33	16,00
Arrefecimento	30,86	30,86	30,86	29,85
Embreagem	33,38	33,38	33,38	0,00
Caixa de transmissão	25,60	25,60	25,60	27,14
Caixa de transferência	20,00	20,17	20,17	18,18
Diferencial dianteiro	19,33	19,33	19,33	20,67

(Continua)

Componente	A0	A1	A2	A3
Eixo dianteiro	19,16	19,16	21,00	21,00
Munhões	16,42	16,42	16,42	16,42
Cubos de rodas dianteiras	25,43	25,43	23,14	23,14
Suspensão dianteira	14,40	14,40	14,40	14,40
Rodas dianteiras	33,16	23,33	21,35	21,35
Freio dianteiro	34,62	34,62	24,23	24,23
Diferencial traseiro	21,87	21,87	21,87	22,93
Eixo traseiro (boomerang)	16,76	16,38	18,29	18,29
Caixa de bloqueio	12,21	11,58	11,58	11,58
Cubos de rodas intermediários/traseiros	23,08	23,08	20,62	20,62
Suspensão traseira	12,00	12,00	12,00	12,00
Rodas intermediárias/traseiros	20,00	20,00	18,30	18,30
Freios traseiros	34,62	34,62	24,23	24,23
Sistema elétrico	27,78	22,22	22,22	35,56
Válvulas de comando	38,23	17,50	17,50	17,50
Direção	22,32	22,32	22,32	22,32
Controle do freio	22,50	20,45	20,45	20,45
Freio de estacionamento	12,40	12,40	12,40	12,40
Ar comprimido	19,73	17,61	16,90	16,50
Carroceria	11,00	11,00	11,00	9,85
Bomba de porão	42,00	18,00	18,00	18,00
Caixa de navegação	12,96	12,96	13,92	13,92
Hélices	13,09	13,09	13,09	13,09
Lemes	14,50	14,50	14,50	14,50
Prancha quebra-ondas	10,80	10,80	10,80	10,80
Porta traseira	6,00	6,00	8,67	8,67
Cobertura do motor	10,22	10,22	10,22	10,22
CTIS			11,22	11,22
Para-brisas			9,00	9,00
Ar condicionado				5,50
NPRG	808,29	743,17	740,86	713,45
				(Conclusão)

Fonte: autor.

A partir da apreciação dos NPR, a análise do projeto original apontou os componentes mais críticos, que são:

1. Bomba de porão, cujo acionamento é feito por correias. Este conceito foi abandonado nas versões posteriores do próprio carro.
2. Válvulas de comando, eletropneumáticas, que são posicionadas no porão do veículo em localização inundável. Nas versões posteriores, o comando passou a ser pneumático, localizado no próprio painel do veículo.
3. Freios traseiros (a tambor) uma deficiência crítica do projeto do veículo, que, nas versões mais modernas passou a empregar freios à disco.
4. Sistema elétrico, com dois circuitos, concepção que também foi abandonada.
5. Freios dianteiros (mesma situação dos dianteiros).
6. Ventilador do sistema de arrefecimento, cujo acionamento é realizado por cardãs, cujos problemas de alinhamento são comuns nas versões mais antigas.

O $NPRG_0$ calculado é de 808,29.

4.3.2 Apresentação de alternativas de modernização

As três alternativas de modernização são avaliadas tendo como base a análise do projeto original e o seu resultado, que é a DSM_0 . No caso em questão, a alternativa A_3 é uma evolução da alternativa A_2 , e esta é uma evolução da A_1 , ou seja, as alterações de engenharia de uma alternativa anterior são incorporadas pela posterior.

De modo geral, as análises de risco das alternativas foram procedidas com base nas análises do projeto original. Onde se entendeu haver uma melhoria em relação à confiabilidade, o valor atribuído para ocorrência foi diminuído de acordo com o ganho esperado em relação à menor probabilidade de falha. Em muitos casos, manteve-se os valores de fator de impacto por se entender que não houve mudanças consideráveis nos modos de falha ou nos nós-de-estudo. Entretanto, alterações de engenharia em componentes com importantes inovações conceituais provocaram mudanças consideráveis nas análises, com a criação e eliminação de novas interações e consequentes análises. Os melhores exemplos estão na

alternativa A₃, com a evolução do motor, caixa de transmissão e sistema de arrefecimento. Como mencionado, os resultados das análises de cada alternativa encontram-se na Tabela 4.3.

4.3.2.1 Alternativa A1

A alternativa A₁ é a mais próxima do projeto original. Ela basicamente incorpora alterações de engenharia nos subsistemas elétrico e pneumático, com a substituição dos comandos eletropneumáticos. Outra modernização proposta é uma alteração do sistema de controle do freio, que é uma tentativa de aumentar sua eficiência. Além dessas alterações de engenharia, a bomba de porão, que é acionada mecanicamente é substituída por um modelo elétrico mais confiável. Todas as alterações de engenharia propostas nesta alternativa são simplesmente a adoção de configurações presentes no modelo mais moderno³⁸. A DSM da alternativa A1 está no Apêndice C.

4.3.2.2 Alternativa A2

A alternativa A2 incorpora todas as alterações de engenharia da alternativa anterior mais a incorporação de freios à disco (que corresponde à alteração de quatro componentes) e inclui um sistema de enchimento de pneus (CTIS), que permite ao motorista inflar e esvaziar os pneus do veículo por intermédio de um circuito pneumático³⁹. Além disso, foi adicionado um para-brisas e a porta traseira recebeu um dispositivo de acionamento pneumático. A DSM da alternativa A2 está no Apêndice D.

4.3.2.3 Alternativa A3

Mesmo incorporando todas as alterações de engenharia das alternativas anteriores, a alternativa A3 é radicalmente diferente, porque prevê uma nova motorização. Um novo e mais potente motor requer mudanças em outros

---

³⁸ EE-11 Urutu MVI.

³⁹ Trata-se de um recurso engenhoso para facilitar a transposição de terrenos macios, mediante o aumento da área de contato do pneu com o solo.

componentes, como os subsistemas de arrefecimento, escapamento e de alimentação de ar e combustível. A caixa de transmissão também será alterada, com a substituição do modelo manual para uma automática. Devido ao novo torque de saída, a caixa de transferência será substituída pelo modelo das versões mais modernas. Propõe-se também a adição de ar condicionado. A DSM da alternativa A3 está no Apêndice E.

4.3.3 Ilustrando a análise de um componente

Para um melhor entendimento do método proposto para a realização das análises das alternativas de modernização, pode-se ilustrar a sua aplicação em um componente específico. A bomba de porão é um bom exemplo, por se tratar de um componente importante para a segurança de operação do veículo durante a navegação. Para efeitos da análise, entende-se como bomba de porão o conjunto formado pela própria bomba e pela tubulação de saída da água.

Tabela 4.4 - Interações que partem da bomba de porão para os demais componentes.

	<i>Componente</i>	<i>Tipo</i>	<i>O</i>	<i>FI</i>	<i>Nó-de-estudo</i>	<i>Palavra-guia</i>
Original	Caixa de transferência	Física	2	1	alinhamento/montagem	errado
	Caixa de transferência	Energia	2	1	resistência ao movimento	maior
	Carroceria	Física	0	0	não considerado	
Modernizado	Sistema elétrico	Física	0	0	não considerado	
	Sistema elétrico	Energia	0	0	não considerado	
	Carroceria	Física	0	0	não considerado	

Fonte: autor.

A análise está resumida nas Tabelas 4.4 e 4.5. A Tabela 4.4 apresenta o quadro das interações que partem da bomba de porão para os demais componentes. A Tabela 4.5, por sua vez, apresenta as interações que partem dos componentes para a bomba de porão, além da análise da própria bomba (na verdade, uma “auto interação”, analisada por FMEA). Como os valores atribuídos para Ocorrência, Severidade e Fator de Impacto resultam no NPR do componente, a Tabela 4.5 apresenta os valores e os respectivos cálculos.

Tabela 4.5 - Interações para a bomba de porão e cálculo do NPR do componente.

	<i>Componente</i>	<i>Tipo</i>	<i>O</i>	<i>FI</i>	<i>OxFI</i>	<i>Função/nó-de-estudo</i>	<i>Modo de falha / palavra-guia</i>
Original	Caixa de transferência	Física	5	1	5	alinhamento/montagem	errado
	Caixa de transferência	Energia	5	1	5	torque	nenhum
	Carroceria	Física	0	0	0	não considerado	
	Bomba de porão	Auto	4	1	4	drenar água em navegação	não funciona
	$\Sigma O \times FI =$				14		
	Média ponderada =				4,667		
	Severidade =				9		
Modernizado	NPR =				42		
	Sistema elétrico	Física	0	0	0	não considerado	
	Sistema elétrico	Energia	2	1	2	tensão	nenhum
	Carroceria	Física	0	0	0	não considerado	
	Bomba de porão	Auto	2	1	2	drenar água em navegação	não funciona
	$\Sigma O \times FI =$				4		
	Média ponderada =				2		
	Severidade =				9		
	NPR =				18		

Fonte: autor.

4.3.3.1 A bomba de porão original

A bomba de porão original é movida mecanicamente por meio de correias, que são acionadas pela caixa de transferência. Isso equivale dizer que a bomba possui interações físicas e energéticas com aquele componente. A bomba também apresenta interações com a carroceria do veículo.

Como colocado na Tabela 4.5, as interações que partem da caixa de transferência foram consideradas críticas. Por ser um item de segurança, admitiu-se um fator de impacto igual ao máximo possível (1). A interação (física) com a carroceria foi desprezada para fins da análise, uma vez que se trata de uma união imóvel. Em relação à própria bomba em si, o modo de falha “não funciona” em relação à drenagem de água também recebeu fator de impacto máximo. Para todas

as análises, foram atribuídos valores de ocorrência de acordo com informações obtidas de especialistas.

4.3.3.2 A bomba de porão modernizada

A nova bomba de porão é elétrica, não mais existindo a ligação com a caixa de transferência do veículo. Também se trata de um modelo mais robusto, própria para aplicação militar, com menor registro de falhas.

Para fins da análise, eliminam-se as interações com a caixa de transferência e cria-se uma interação energética com o sistema elétrico. A melhoria do modelo adotado é manifestada por meio de um menor valor atribuído para a ocorrência. Não se alteram os valores de fator de impacto, uma vez que as consequências mantêm-se as mesmas para uma eventual falha.

4.3.4 Análise de alternativas

Como exposto no método, cada alternativa é estudada a partir da análise do projeto original em um processo de revisão que abrange os valores atribuídos para severidade (máxima, do componente reprojetoado), ocorrência e fator de impacto. A revisão abrange os componentes reprojetoados e suas interações ativas (do componente analisado para outro) e passivas (de outro componente para o que está em análise). Nem sempre a revisão de uma análise modifica os parâmetros ligados a ela. Isto ocorre por decisão do analista, tendo em vista não ocorrer variações consideráveis. A Tabela 4.6 apresenta, de forma resumida, um quadro sobre as análises das interações, apontando onde houve alteração de parâmetros.

Tabela 4.6 – Quadro descritivo das revisões de interações.

Componentes revisados	Interações ativas						Interações passivas					
	Com alteração			Sem alteração			Com alteração			Sem alteração		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Admissão de ar						5			1			2
Admissão de combustível						4			1			3
Ar comprimido	4	10	10	15	15	15	2	7	7	15	15	15
Ar condicionado			2						3			
Arrefecimento			3			6			3			8
Bomba de porão	1	1	1				2	2	2			
Caixa de transferência			3			12			3			12
Caixa de transmissão			6			4			7			3
CTIS		10	10					10	10			
Controle do freio	1	1	1	8	8	8	1	1	1	8	8	8
Escapamento						3						5
Freio dianteiro		2	2		4	4		2	2		4	4
Freios traseiros		3	3		3	3		3	3		3	3
Motor			8			16			3			17
Munhões		2	2		1	1		2	2		1	1
Para-brisas		1	1					1	1			
Porta traseira		3	3		1	1		4	4		1	1
Sistema elétrico	2	2	3				1	1	1	1	1	1
Suporte do motor						2			2			1
Válvulas de comando	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
Ventilador			1			1			2			

Fonte: autor.

4.3.5 Seleção das alternativas

Como colocado na apresentação do método, a tomada de decisão do modelo proposto baseia-se no uso de uma medida de desempenho global esperada, representativa das contribuições de várias Medidas Técnicas de Desempenho (TPM, abreviatura de *Technical Performance Measures*), composta de acordo com seus graus de importância.

Para os propósitos deste trabalho, uma medida simples de desempenho global de cada alternativa de configuração foi modelada como uma distribuição normal⁴⁰, a partir de uma comparação com o desempenho esperado do veículo

⁴⁰ Procurou-se adotar esta simplificação tendo em vista apenas testar a influência do NPRG, que não depende das medidas de desempenho. Se necessário, pode-se consultar Smaling e De Weck (2007) para um exemplo de uma utilização mais apurada e detalhada.

original, cujo valor convencionou-se como igual à unidade. Esta medida é uma estimativa fornecida pela equipe de projeto⁴¹, questionada da seguinte forma: “baseado em suas expectativas e comparando com o desempenhos de veículos semelhantes, como você quantificaria o desempenho desta alternativa de modernização em relação ao projeto original?”

Também foi estabelecido um valor alvo da medida de desempenho global igual a 1,2, que se equivale ao valor esperado da alternativa A2.

A Tabela 4.7 apresenta um comparativo entre os valores de custo-benefício entre as alternativas analisadas.

Tabela 4.7 - Análise de alternativas.

	NPRG	Desempenho		$P(d < d_{alvo})$	$\mathfrak{R}_i$	$\Delta \mathfrak{R}_i$	Custo	ΔCusto	Custo/ benefício
		Média	DP						
A0	808,29	1	0,1	0,977	789,90		200		
A1	743,17	1,1	0,11	0,818	608,18	181,73	350	150	0,825
A2	740,86	1,2	0,13	0,500	370,43	419,47	400	200	0,477
A3	713,45	1,5	0,18	0,048	34,096	755,80	500	300	0,397

Fonte: autor.

Para verificar a influência do valor adotado como meta de desempenho dentro da análise, foi realizada uma análise de sensibilidade, como apresentado no Gráfico 4.2. Percebe-se uma alternância da configuração mais vantajosa em razão do valor adotado como meta ou alvo de desempenho. Metas muito modestas de desempenho não justificariam a adoção da alternativa A₃. Entretanto, a vantagem da alternativa A₃ em relação ao menor quadro de riscos permite que a mesma seja mais vantajosa para metas a partir de aproximadamente 1,15 vezes o desempenho original, sendo que esta vantagem é aumentada em valores mais altos.

É oportuno assinalar que a metodologia proposta é uma variação do modelo de Smaling e De Weck (2007), cuja aplicação do índice de invasão de tecnologia

⁴¹ Para o desenvolvimento do estudo de caso, a equipe de projeto é composta por este autor e por parte do pessoal da Organização Militar diretamente envolvido com a gestão dos trabalhos de recuperação e modernização de viaturas blindadas. Também participou da equipe o preposto de uma empresa contratada. Ao todo, foram envolvidos três oficiais engenheiros mecânicos auxiliados por uma turma de avaliadores (dois sargentos mecânicos com mais de dez anos de experiência na avaliação técnica) e pelo preposto (ex-funcionário da Engesa).

certamente penalizaria a alternativa A_3 em virtude de uma quantidade bem maior de alterações de engenharia, como pode ser observado na Tabela 4.8. Uma comparação entre o método aqui proposto e o de Smaling e De Weck é decerto injusta, uma vez este se aplica a inserção de novas tecnologias, cujas incertezas são bem mais consideráveis. Entretanto, é salutar que a ação do projetista em reprojetar um componente e, por consequência, suas interações, no intuito de introduzir uma melhoria de projeto, não seja penalizada na avaliação de riscos para decisão em projeto.

Gráfico 4.2 - Análise de sensibilidade.

Fonte: autor.

Cabe ressaltar a grande influência que a metodologia proposta sofre da subjetividade das análises de riscos, tanto na quantificação dos números de prioridade de risco (do componente e, por consequência, global da alternativa) quanto na determinação do que pode ou não ser desprezado.

Tabela 4.8 - Quantidade de alterações em interações.

	<i>Projeto</i>	<i>Física</i>	<i>Energética</i>	<i>Massa</i>	<i>Informacional</i>	<i>Inclusão</i>	<i>Exclusão</i>	<i>Total</i>
A1	5	36	25	17	0	0	0	83
A2	11	57	39	25	0	2	0	134
A3	21	105	77	37	0	3	1	244

Fonte: autor.

4.4 Estudo de caso sobre projeto detalhado

Como apresentado anteriormente, o projeto detalhado da revitalização e modernização de um produto compõe-se de uma série de decisões específicas sobre o elemento de trabalho. Essencialmente, trata-se de um trabalho volumoso, tendo em vista a grande quantidade de elementos que compõem o produto. Sua demonstração como caso exemplo nesta tese deve se limitar a algumas aplicações, para evitar repetição e tornar menos cansativa sua leitura.

No sentido de exemplificar a aplicação da metodologia proposta, foi escolhido o subsistema formado pelos componentes da suspensão dianteira e do eixo dianteiro (que comporta também o freio dianteiro), conforme pode ser observado na Figura 4.3, que apresenta um desenho do subsistema selecionado e nas Figuras 4.4 e 4.5, que detalham os elementos componentes do subsistema, excetuando-se os classificados como M0. Os componentes das Figuras 4.4 e 4.5 estão numerados conforme o catálogo original, sendo que o dígito anterior ao ponto representa o número da figura do catálogo e os dígitos posteriores representam a própria referência do elemento na figura do catálogo original.

Figura 4.3 - Subsistema de estudo.

Fonte: adaptado de Engesa (1980).

Apenas para efeito de melhor apresentação nesta tese, este subsistema será denominado “subsistema de estudo”.

A suspensão dianteira do EE-11 Urutu, vide Figura 4.4, é do tipo independente, com membros triangulares, molas helicoidais (principal e secundária) e amortecedores telescópicos com dupla ação.

Figura 4.5 - Subsistema de estudo: eixo dianteiro (excluído o diferencial).

5.15	terminal	5.22	rolamento	5.51	cubo	5.33	arruela	5.37	junta
5.16	semi-eixo	5.23	ponteira	5.30	rolamento	5.34	porca	5.38	tampa
5.19	munhão	5.25	defletor	5.31	rolamento	5.35	junta	5.44	prato do freio
5.20	retentor	5.28	retentor	5.32	porca	5.36	flange	5.49	tambor do freio

Fonte: Engesa (1980).

Considerando a configuração do projeto da alternativa A3, algumas alterações de engenharia *top-down* foram propostas para o subsistema de estudo: mudança no sistema de freio, que passa a ser a disco e incorporação de enchimento de pneus. Tais alterações de engenharia significam pelo menos a substituição do cubo de roda, do munhão e da ponteira. O cubo de roda original (Figura 4.5, item 5.51) acoplava-se ao tambor do freio (item 5.49). O novo modelo do cubo de roda é uma peça fundida e usinada que já comporta o disco de frenagem. O desenho do novo munhão difere-se do original por possuir abas laterais para a fixação das pinças de freio. Já a nova ponteira, apesar de possuir basicamente as mesmas dimensões da original, apresenta pontos para a conexão do sistema de enchimento de pneus. A configuração do subsistema de estudo proposta na alternativa A3 equivale-se parcialmente à configuração adotada pelos modelos mais modernos do EE-11 Urutu.

Figura 4.6 - Configuração A3 proposta para o subsistema de estudo.

Fonte: Engesa (1980).

4.4.1 Análise dos elementos de trabalho: técnica, de manutenibilidade e de suporte

Originalmente, o subsistema de estudo possui⁴² 70 elementos de trabalho referentes à suspensão dianteira e 52 elementos de trabalho pertencentes ao eixo dianteiro. Uma análise inicial arbitrou que apenas 48 elementos de trabalho não são classificados como M0, pois não se enquadram nas condições de classificação dessa categoria. Os 48 elementos de trabalho estão representados nas Figuras 4.4 e 4.5 e são submetidos às demais análises.

⁴² O subsistema de estudo possui dois lados simétricos e a quantidade de peças por elemento de trabalho é sempre par. Neste trabalho, não há nenhuma diferenciação entre lados.

O prosseguimento da análise dos elementos de trabalho restantes visa avaliar as condições de projeto, manutenção e de suporte.

As características de projeto dos elementos de trabalho do subsistema de estudo, excluídos os determinados para reprojeção em virtude do projeto preliminar (alterações de engenharia *top-down*), satisfazem os questionamentos de projeto neste momento da análise, não havendo imposições para uma modernização.

A análise técnica prossegue determinando quais elementos devem ser classificados arbitrariamente como M1: juntas e retentores.

Na análise de manutenção, os elementos foram identificados em relação a práticas usuais de manutenção preventiva, que são realizadas durante a fase de operação:

1. Engraxamento, que ocorre a cada ano ou 1.500 km ou após uma operação em água (navegação ou passagem de vau).
2. Verificação da fixação e estanqueidade do amortecedor, que ocorre a cada 5.000 km ou a cada seis meses.
3. Manutenção dos freios, que é específica e compreende a verificação de vazamentos, regulagem e substituição de componentes desgastados (quando houver), e que é realizada a cada

Esta análise de manutenção poderia indicar a oportunidade de modernização de um elemento de trabalho com a finalidade de eliminar ou diminuir as operações de engraxamento, assunto que será explorado como caso na análise de reprojeção.

A análise de suporte é realizada com a classificação de cada elemento de trabalho em relação a duas características:

1. Origem: comercial, não-comercial. Elementos de trabalho fabricados pela própria Engesa recebem esta classificação. Atualmente, são fornecidos por poucos fornecedores, a partir de desenhos originais.
2. Facilidade de obtenção, em três níveis: fácil, médio, difícil.

4.4.2 Análise de expectativas de custos

A análise de expectativas de custos define a classificação final dos elementos de trabalho destinados à manutenção. Para que não fique demasiado longa, esta seção e suas divisões apresentam apenas as análises referentes a cinco elementos de trabalho selecionados⁴³.

As análises foram realizadas em planilha eletrônica, utilizando o Excel®. A otimização foi procedida por meio das ferramentas de análise do próprio programa.

As análises de expectativas de custos dos cinco elementos selecionados baseiam-se na aplicação das fórmulas referentes às classificações M1, M2 e M3. Nessas fórmulas, são dados de entrada:

1. Os valores de custos e das várias penalizações⁴⁴. Nesta apresentação, todos os valores são parametrizados em relação ao custo unitário de aquisição.
2. Tempos de operação e de nova operação. Adota-se uma parametrização em torno do tempo de operação do veículo (aproximadamente 30 anos). A nova operação desejada é de 15 anos, ou seja, a metade do tempo de operação.
3. Parâmetros de confiabilidade. Adota-se a distribuição de Weibull de dois parâmetros para todos os elementos. O cálculo dos parâmetros é realizado com o uso de dados de consumo⁴⁵ do elemento durante o tempo de operação, empregando o método exposto na seção 2.3.3.
4. Taxa de reposição.

---

⁴³ Todos os elementos de manutenção do subsistema de estudo foram avaliados em termos de análise de expectativa de custos. O resultado pode ser observado na planilha de trabalho nos apêndices F e G.

⁴⁴ Os custos (de aquisição, de reparação, etc) são obtidos a partir de pesquisa de mercado sobre os valores praticados. Em relação às penalizações de produção, são empregadas estimativas baseadas nas possíveis consequências (da parada de linha, excesso de material, compra emergencial). Em relação às penalizações de falhas na operação, utiliza-se uma estimativa de custo baseada na mão-de-obra necessária para executar o serviço e das prováveis peças a serem substituídas em razão de uma falha indesejada em determinado elemento.

⁴⁵ Infelizmente, não se dispõe de informações mais precisas sobre falhas de componentes que contenham tempo até a falha. Daí a razão em se adotar esta linha de ação.

Os valores dos dados de entrada para as penalizações parametrizadas em relação ao custo unitário de aquisição C estão apresentados na Tabela 4.9. Como mencionado acima, adota-se $T_{NOP} = 0,5 T_0$.

Tabela 4.9 – Penalizações parametrizadas dos elementos da análise.

Item	Penalizações			
	P_{il}	P_{pd}	P_{ix}	P_f
2.15 Bandeja inferior	1,35 C	6,92 C	1,00 C	10,38 C
2.49 Haste	1,33 C	6,67 C	0,67 C	13,33 C
2.53 Mola	1,50 C	12,50 C	1,00 C	25,00 C
5.16 Semieixo	1,31 C	4,35 C	0,87 C	13,05 C
5.22 Rolamento*	1,27 C	8,49 C	0,00	84,88 C

Fonte: autor.

Por sua vez, os dados de entrada necessários para os cálculos de confiabilidade estão apresentados na Tabela 4.10, que também contém os resultados dos cálculos de confiabilidade para os diversos tempos, considerando a distribuição de Weibull para a probabilidade de falhas, considerando o método de cálculo exposto na seção 2.3.3.

Tabela 4.10 - Análises de confiabilidade dos elementos selecionados.

Item	Dados de entrada				Valores calculados		
	%	t/η	η	β	$R(T_0)$	$R(T_{NOP})$	$R(T_{NOP} \text{sobreviveu } T_0)$
Bandeja inferior	3,33%	0,0333	30,30 T_0	1	0,9675	0,9836	0,9836
Haste	14,67%	0,1467	6,82 T_0	1	0,8636	0,9293	0,9293
Mola	4,00%	0,05	20,00 T_0	1,1	0,9636	0,9828	0,9794
Semieixo	3,33%	0,05	20,00 T_0	1,2	0,9729	0,9881	0,9829
Rolamento	138%	1,5	0,67 T_0	1,3	0,1838	0,5026	0,3086

Fonte: autor.

Além da classificação final dos elementos de trabalho de manutenção, a análise de expectativas de custos pode fornecer uma quantidade q que minimiza os custos, podendo ser adotada como previsão de consumo.

Para que se observe vários casos aplicáveis, as subseções seguintes exploram várias situações para a taxa de reposição. Para todas as análises, trabalha-se com uma população de 50 veículos a serem recuperados e modernizados. A quantidade de peças por veículo de cada elemento de trabalho é igual a dois.

4.4.2.1 Taxa de reposição como um valor específico

As primeiras análises são realizadas tomando-se a taxa de reposição como um valor determinado. As análises são realizadas comparando-se os valores de expectativas de custos para as classificações M2 e M1, de acordo com as fórmulas apresentadas. Para isso, utiliza-se uma planilha eletrônica, cujo mecanismo de otimização é empregado para a determinação da quantidade q que minimiza a expectativa de custos para a classificação M2.

As Tabelas 4.11 a 4.13 apresentam resumidamente os resultados de três análises diferentes para os cinco elementos de trabalho selecionados. São adotados valores de taxa de reposição iguais a zero, dez e cinquenta por cento, expostos em cada uma das tabelas, respectivamente.

Tabela 4.11 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um valor específico igual a zero.

<i>Elemento</i>	C_{M1}	C_{M2}	<i>FARM</i>	<i>Decisão</i>	q
Bandeja inferior	1,1716	0,1714	0,1463	M2	0
Haste	1,9431	0,9430	0,4853	M2	0
Mola	1,4282	0,5153	0,3608	M2	0
Semieixo	1,1550	0,2228	0,1929	M2	0
Rolamento	43,2221	58,687	1,3578	M1	100*

* A decisão M1 implica essa quantidade.

Fonte: autor.

Tabela 4.12 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um valor específico igual a 10%.

<i>Elemento</i>	C_{M1}	C_{M2}	<i>FARM</i>	<i>Decisão</i>	<i>q</i>
Bandeja inferior	1,1716	0,3281	0,2801	M2	10
Haste	1,9431	1,0945	0,5633	M2	10
Mola	1,4282	0,6830	0,4781	M2	11
Semieixo	1,1550	0,3589	0,3107	M2	9
Rolamento	43,2221	57,183	1,3230	M1	100*

* A decisão M1 implica essa quantidade.

Fonte: autor.

Tabela 4.13 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um valor específico igual a 50%.

<i>Elemento</i>	C_{M1}	C_{M2}	<i>FARM</i>	<i>Decisão</i>	<i>q</i>
Bandeja inferior	1,1716	0,7480	0,6385	M2	48
Haste	1,9431	1,5129	0,7786	M2	49
Mola	1,4282	1,0779	0,7546	M2	51
Semieixo	1,1550	0,7465	0,6462	M2	47
Rolamento	43,2221	51,0151	1,1803	M1	100*

* A decisão M1 implica essa quantidade.

Fonte: autor.

Em relação aos resultados das Tabelas 4.11 a 4.13, nota-se que apenas o rolamento possui *FARM* maior do que 1 para todas as análises, evidenciando receber a classificação M1.

Os resultados da análise para o rolamento em termos de expectativas de custo decerto são bastante elevados, pois são bem maiores do que a unidade. Há uma indicação evidente de que a ordem de grandeza da vida útil dos rolamentos é menor do que os tempos considerados para as fases de operação (anterior e posterior à recuperação), tendo em vista os baixos valores de confiabilidade calculados. Este fato traz à tona uma limitação da análise de expectativas de custos em relação a elementos com baixa confiabilidade ao final do tempo de operação. Cabe ressaltar que a decisão gerencial em classificar arbitrariamente como M1 os elementos de trabalho que frequentemente são repostos em revisões regulares pode ser explicada como uma decorrência desta limitação.

Além da forte correlação entre taxa de reposição e a quantidade q (deduzida da própria fórmula), observa-se que os valores de *FARM* para os elementos de trabalho M2 também tem correlação positiva com a *TR*, ao contrário do rolamento. Uma interpretação para tal fato é que, para elementos M2 com alta *TR*, as incertezas sobre as quantidades demandadas acabam influenciando demasiadamente a expectativa de custos, podendo-se chegar a um ponto no qual não se compensa mais adotar a reposição apenas quando necessária, o que altera a classificação para M1.

4.4.2.2 Taxa de reposição como uma intervalo de valores

Tendo em vista que a taxa de reposição não é um valor conhecido antes da execução dos trabalhos, pode-se adotá-la como uma faixa ou intervalo de valores que representariam uma opinião ou expectativa.

Para representar o intervalo de possíveis valores da taxa de reposição, convencionou-se que estes são discretos, variando de zero a 100. Assim, o intervalo de valores pode ser representado por uma distribuição uniforme discreta, da forma⁴⁶ apresentada na equação 4.1.

$$f(x; a, b) = \begin{cases} \frac{1}{b - a + 1} & , a \leq TR \leq b \\ 0 & , \text{para demais valores} \end{cases} \quad (4.1)$$

onde,

$[a, b]$ = intervalo de valores para *TR*

O valor esperado do custo total unitário é calculado pela equação 4.2.

$$C_{M2} = \sum_{i=0}^{100} f(i) \cdot C_{M2}(i) \quad (4.2)$$

⁴⁶ O cálculo sugerido é um exemplo da aplicação do método proposto, apresentado de forma didática. Há uma proposital coincidência com a quantidade de peças para previsão, fazendo com que esta seja equivalente à porcentagem da própria taxa de reposição.

Desta forma, as Tabelas 4.14 a 4.16 apresentam os resultados de diversas análises, considerando três intervalos diferentes para a taxa de reposição. Notar que o intervalo adotado para a Tabela 4.16 refere-se a uma situação de total incerteza sobre a taxa de reposição.

Tabela 4.14 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um intervalo de valores possíveis [0%, 5%].

<i>Elemento</i>	C_{M1}	C_{M2}	<i>FARM</i>	<i>Decisão</i>	<i>q</i>
Bandeja inferior	1,1716	0,2427	0,2075	M2	2
Haste	1,9431	1,0113	0,5205	M2	3
Mola	1,4282	0,6033	0,4223	M2	4
Semieixo	1,1550	0,2813	0,2435	M2	2
Rolamento	43,2221	58,337	1,3497	M1	100*

* A decisão M1 implica essa quantidade.

Fonte: autor.

Tabela 4.15 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um intervalo de valores possíveis [0%, 10%].

<i>Elemento</i>	C_{M1}	C_{M2}	<i>FARM</i>	<i>Decisão</i>	<i>q</i>
Bandeja inferior	1,1716	0,2839	0,2427	M2	4
Haste	1,9431	1,0519	0,5414	M2	4
Mola	1,4282	0,6522	0,4566	M2	6
Semieixo	1,1550	0,3163	0,2738	M2	3
Rolamento	43,2221	57,966	1,3411	M1	100*

* A decisão M1 implica essa quantidade.

Fonte: autor.

Tabela 4.16 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição como um intervalo de valores possíveis [0%, 100%].

<i>Elemento</i>	C_{M1}	C_{M2}	<i>FARM</i>	<i>Decisão</i>	<i>q</i>
Bandeja inferior	1,1716	0,8520	0,7283	M2	17
Haste	1,9431	1,6056	0,8263	M2	19
Mola	1,4282	1,2409	0,8687	M2	24
Semieixo	1,1550	0,8347	0,7226	M2	15
Rolamento	43,2221	50,653	1,1720	M1	100*

* A decisão M1 implica essa quantidade.

Fonte: autor.

É possível também adotar valores mais específicos para o intervalo da taxa de reposição, conforme se disponha de informação advinda de especialistas ou de

produções passadas e/ou semelhantes. Neste caso, a Tabela 4.17 apresenta os resultados de uma análise deste tipo, com os intervalos de taxa de reposição sugeridos por analistas da própria Organização Militar. Para fins de simplificação, é adotada esta situação para todos os outros elementos de trabalho analisados, cujo resultado está inserido na planilha de trabalho do Apêndice F.

Tabela 4.17 - Resultados das análises de expectativas de custos considerando taxa de reposição em intervalos individualizados para cada elemento.

Item	Intervalo		Saída				q
	Inicial	Final	C_{M1}	C_{M2}	FARM	Class	
Bandeja inferior	0	5	1,1716	0,113623	0,108747	M2	2/100
Haste	0	5	1,9431	0,400778	0,301518	M2	2/100
Mola	0	5	1,4282	1,072754	0,420603	M2	3/100
Semieixo	0	5	1,1550	0,371537	0,307858	M2	3/100
Rolamento	50	100	43,2221	94,046194	1,100686	M1	100/100

Fonte: autor.

4.4.2.3 Taxa de reposição desconhecida, com atualização bayesiana durante a produção

Para ilustrar a aplicação de atualizações bayesianas, recorre-se ao emprego de uma distribuição discreta para representar valores possíveis da taxa de reposição, como foi proposto na subseção anterior. As revisões ou atualizações bayesianas são aplicadas nesta distribuição, fazendo-se que as evidências observadas alterem o seu formato. Para tanto, é empregado o modelo descrito em Bolstad (2004) sobre inferência bayesiana para variáveis aleatórias discretas, particularmente a aplicação do teorema de Bayes para distribuição binomial com distribuição a priori discreta.

A distribuição a priori escolhida para aplicação é uma distribuição discreta uniforme [0%, 100%], ou seja, todos os possíveis valores da taxa de reposição (π_i) têm a mesma probabilidade. Trata-se, portanto, de uma representação exagerada da incerteza sobre a taxa de reposição.

A função de verossimilhança é binomial (n, π_i) avaliada para o número de reposições y em n oportunidades. As probabilidades a posteriori são calculadas pela

multiplicação entre a probabilidade a priori e a verossimilhança, devidamente divididas pelo seu somatório.

Para poder ilustrar esta aplicação, foram adotados dados reais de consumo de elementos de trabalho equivalentes da recuperação de 50 veículos EE-9 Cascavel, sendo feitas revisões a cada dez carros. De acordo com as propriedades da inferência bayesiana, a distribuição a posteriori de uma revisão é empregada como distribuição a priori na próxima revisão.

Os Gráficos 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam resumidamente as análises em quatro dos elementos selecionados. Os gráficos representam a taxa de reposição em forma de uma distribuição.

Gráfico 4.3 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento bandeja por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição.

Fonte: autor

O Gráfico 4.3 representa as sucessivas revisões do elemento 2.15 bandeja inferior. É um elemento que apresentou nenhuma evidência de consumo nas duas primeiras revisões, fazendo com que a mediana da distribuição representativa da taxa de reposição assumia valores próximos de zero. A evidência do consumo de duas unidades na terceira revisão desloca a mediana para a direita e aumenta a expectativa de custo C_{M2} (na verdade, é uma correção para valores mais verdadeiros, já que houve reposição).

Gráfico 4.4 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento haste por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição.

Fonte: autor

O Gráfico 4.4, referente ao elemento de trabalho 2.49 haste, ilustra o comportamento da distribuição que representa a taxa de reposição sendo submetida a revisões com evidências relativamente “semelhantes”, ou seja, há pouca variação nas quantidades consumidas nas quatro revisões. A tendência é que a distribuição da taxa de reposição tenha sua mediana próxima a um valor médio observado e que

a dispersão diminua. Os valores de C_{M2} variam de acordo com a quantidade q necessária.

Gráfico 4.5 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento mola por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição.

Fonte: autor

O Gráfico 4.5, do elemento 2.55 mola, representa a situação na qual não há evidência de consumo nas quatro revisões, o que leva a distribuição da taxa de reposição a valores cada vez mais próximos de zero.

O comportamento do Gráfico 4.6 (elemento 5.16 semieixo) também ilustra o efeito das revisões para a distribuição representativa da taxa de reposição, não apresentada nenhuma ocorrência diferente das apresentadas nos demais gráficos.

Gráfico 4.6 - Evolução da análise de expectativas de custos do elemento semieixo por intermédio de atualizações bayesianas da distribuição da taxa de reposição.

Fonte: autor

Em termos práticos, as aplicações ilustradas nesta subseção são um exemplo do quarto passo da metodologia proposta para recuperação e modernização de produtos. Entretanto, as atualizações desta fase não necessariamente se resumem aos valores da taxa de reposição. Ainda seria possível rever valores de custos e de penalizações, uma vez que durante a fase de produção, dados reais podem ser obtidos.

4.4.3 Análise de dependências

Como exposto no método, a análise de dependências é realizada por intermédio do emprego de uma DSM que abrange o subsistema de estudo. Inicialmente, elaborase uma DSM simples, que apenas assinala as interações entre

elementos de trabalho. A partir da DSM original, é desenvolvida a classificação proposta das interações, conforme os critérios apresentados no método.

A DSM resultante da presente análise e demais informações advindas das análises anteriores compõem a planilha de trabalho. Devido a questões de formatação do texto, a planilha de trabalho no exato momento desta análise está apresentada no Apêndice G.

4.4.4 Análise de reprojeto

Como mencionado anteriormente, o subsistema de estudo já está previsto a ser reprojetado por conta da modernização do sistema de freio e da inclusão de um sistema central de enchimento de pneus, sendo que estão previstas a substituição dos cubos, munhões e ponteiras.

A análise de reprojeto é realizada elemento por elemento, observando-se as suas premissas, visando verificar questões de projeto e de riscos em cada uma de suas dependências.

4.4.4.1 Elemento 5.19 munhão

O elemento de trabalho 5.19 munhão é reprojetado, sendo substituído por outro modelo, recebendo a classificação R1. O novo modelo difere do anterior apenas por dispor de duas abas para fixação da pinça de freio. São mantidas as demais dimensões, principalmente as de interações com os demais elementos de trabalho. Assim:

1. Todas as dependências originais ativas e passivas do elemento 5.19 estão resolvidas em termos de projeto.
2. Todas as dependências originais ativas e passivas do elemento 5.19 munhão mantêm o mesmo perfil de risco.
3. Inserem-se novas dependências do elemento 5.19 com o elemento 5.55 pinça de freio, da seguinte forma:

- a. 5.19 munhão influencia localmente o projeto da 5.55 pinça (interações físicas e energéticas), recebendo grau 3.
  - b. 5.55 pinça influencia localmente o projeto do 5.19 munhão (interações físicas e energéticas), recebendo grau 3.
4. As análises de riscos das novas dependências serão discutidas na análise do elemento 5.55 pinça.

4.4.4.2 Elemento 5.23 ponteira

O elemento 5.23 ponteira é reprojeto, sendo substituído por novo modelo, recebendo a classificação M1. São mantidas as mesmas dimensões do elemento, que recebe conexões com o sistema de enchimento de pneus.

- 1. Todas as dependências originais ativas e passivas do elemento 5.23 estão resolvidas em termos de projeto.
- 2. Com exceção da interação com o 5.20 retentor e com o 5.49 prato de freio, mantêm-se todas as dependências originais e passivas com o mesmo perfil de risco.
- 3. Com o advento da pressurização provocada pela conexão com o sistema de enchimento de pneus, há uma acentuada alteração na interação energética entre o elemento 5.23 ponteira e o 5.20 retentor, o que provoca o reprojeto do mesmo. Da análise de reprojeto do 5.20 retentor (omitida neste texto), conclui-se que não há propagação para outros elementos de trabalho e que todas as questões de projeto estão resolvidas.
- 4. Inserem-se novas dependências do elemento 5.23 ponteira com o elemento externo sistema de enchimento de pneus, da seguinte forma:
  - a. 5.23 ponteira influencia localmente o projeto do elemento externo (interações físicas e de massa), recebendo grau 3.
  - b. O elemento externo influencia localmente o projeto do 5.23 ponteira (interações físicas e de massa), recebendo grau 3.
- 5. As análises de riscos das novas interações com o elemento externo sistema de enchimento de pneus foram realizadas durante o projeto preliminar.

6. As dependências com o elemento 5.44 prato de freio são excluídas. Como a ponteira mantém um projeto semelhante ao original, esta exclusão não representa um aumento do perfil de risco.

4.4.4.3 Elemento 5.25 defletor

O elemento 5.25 defletor é excluído, por fazer parte do conjunto do freio a tambor, recebendo a classificação E. O elemento 5.25 defletor possui dependências apenas com o 5.44 prato, que também será excluído.

4.4.4.4 Elemento 5.51 cubo

A análise do elemento 5.51 cubo é bem interessante, pois este elemento absorve funcionalidades e interações do elemento 5.49 tambor de freio (que será excluído). Desta forma, o 5.51 cubo é substituído por novo modelo sendo classificado como R1 (evoluído). A análise é realizada em conjunto com a do elemento 5.49 tambor.

1. Todas as dependências originais ativas e passivas do elemento 5.51 cubo estão resolvidas em termos de projeto, pois são mantidas as mesmas características do projeto original em relação ao dimensionamento e montagem.
2. Mantêm-se os perfis de riscos das dependências originais.
3. As seguintes relações de dependências do 5.49 tambor são estudadas quanto à transferência para o elemento 5.51 cubo:
  - a. 5.16 semieixo, de grau 1. Não é necessária nenhuma ação, visto já existir interação de mesmo grau entre o 5.51 cubo.
  - b. 5.23 ponteira, de grau 1. Não é necessária nenhuma ação, visto já existir interação de grau superior entre o 5.51 cubo.
  - c. 5.44 prato de freio, de grau 4. Esta dependência é substituída pela dependência entre o 5.51 cubo e a 5.55 pinça, sendo estudada quando o último elemento for analisado.

4.4.4.5 Elemento 5.44 prato de freio

O elemento 5.44 prato de freio é excluído, recebendo a classificação E. Funcionalmente, a ação de frenagem do prato é exercida pela 5.55 pinça de freio, que, a rigor, é um elemento inserido no produto. Assim:

1. As dependências com o elemento 5.23 ponteira deixam de existir, sem maiores consequências.
2. As dependências com o 5.25 defletor deixam de existir com a exclusão do mesmo.
3. As dependências com o 5.49 tambor de freio também deixam de existir com a exclusão deste.

4.4.4.6 Elemento 5.55 pinça de freio

O elemento 5.55 pinça de freio é inserido (classificação I). Trata-se do mesmo modelo de pinça de freio empregado nos veículos mais modernos tanto do EE-11 Urutu como do EE-9 Cascavel. Considerando aceitáveis o projeto e o perfil de risco do próprio elemento, tendo em vista o histórico de uso do modelo, observam-se as suas dependências com os demais elementos de trabalho:

1. Elemento 5.19 munhão. Como já mencionado, são inseridas dependências de grau 3 em ambos os sentidos. Não há problemas em relação ao risco tendo em vista que tal conceito já é adotado nos modelos mais modernos, além de que análise semelhante foi realizada durante o projeto preliminar.
2. Elemento 5.51 cubo de roda. Inserem-se dependências de grau 3 em ambos os sentidos. Novamente, aceita-se o perfil de riscos por base das análises durante o projeto preliminar.
3. Externo: controle do freio. Inserem-se dependências de grau 3 em ambos os sentidos. Novamente, aceita-se o perfil de riscos por base das análises durante o projeto preliminar.

4.4.4.7 Encerramento da análise

Ao final da análise, o projetista certifica-se de que todas as dependências originais submetidas às alterações de engenharia foram devidamente analisadas.

Analizando o reprojeto do elemento 5.20, que não estava previsto no projeto preliminar, verifica-se de que se trata de um projeto de fácil solução, a partir da seleção de um novo retentor dimensionado para a vedação de ar comprimido na pressão de trabalho do sistema de enchimento de pneus (4,5 kgf/cm²).

As alterações de engenharia no projeto também resultam em modificações nos procedimentos de manutenção durante a operação, com certa melhora em termos de manutenibilidade, uma vez que não há mais a necessidade de desmontagem de componentes para acesso aos elementos do freio.

A planilha de trabalho é atualizada e o resultado é apresentado no Apêndice F.

4.5 Discussão sobre o estudo de caso

A estratégia de aplicação seletiva da metodologia proposta foi observada na condução do estudo de caso. Nessa estratégia, apenas o terceiro e o quarto passo foram formalmente aplicados dentro dos trabalhos do desenvolvimento desta tese. Mesmo assim, verificou-se que os dois primeiros passos (análise do produto e análise da operação) já haviam sido de alguma forma executados pela Organização Militar ao longo de seus trabalhos, mesmo que de uma maneira não formalizada.

São as informações resultantes dos dois primeiros passos que alimentam as decisões durante o projeto preliminar e o projeto detalhado.

É importante considerar as limitações devidas às características do objeto do caso exemplo para a avaliação da metodologia. O veículo, na versão de transporte de tropa, possui uma configuração demasiada simples em relação, por exemplo, à eletrônica embarcada. Isso não possibilitou avaliar a metodologia diante de um caso mais completo, com situações de análises de interações informacionais. Sistemas de armamento de carros de combate (que são constituídos de um armamento

principal, que é um canhão) juntamente com seus sistemas de Instrumentos de Observação, Direção e Controle de Tiro (IODCT) poderiam compor um caso exemplo de maior relevância para a apreciação da metodologia.

O projeto preliminar do estudo de caso foi beneficiado com o projeto dos protótipos pela Organização Militar. Essa experiência proporcionou à equipe de projeto uma base para a elaboração das análises dessa fase. Como mencionado anteriormente, o emprego de julgamentos de especialistas na avaliação do risco torna as análises bastante subjetivas. A subjetividade também se verificou na construção de uma função de desempenho, por opção da equipe que conduziu o estudo de caso. É importante recordar que, nesta fase do projeto, pode não haver dados e valores reais de desempenho para alternativas propostas, apenas metas idealizadas.

As análises do projeto preliminar também se mostraram bastante trabalhosas, requerendo o uso de um banco de dados ad-hoc. No final, esse trabalho se mostrou interessante por proporcionar uma revisão sistemática do projeto, no sentido de identificar pontos que poderiam ser melhorados no veículo. Um emprego simplificado do método poderia ser a obtenção e análise da DSM_0 para identificação, análise e tratamento de riscos, no intuito de subsidiar o projeto de modernização, sem necessariamente haver seleção de alternativas de projeto.

Em relação ao projeto detalhado, ainda que limitado a um subsistema de estudo, verificou-se um grande volume de trabalho, seja para a condução das análises, seja para a classificação dos elementos de trabalho com base nas expectativas de custos. Novamente, o julgamento subjetivo assume uma relativa importância, principalmente nas análises de reprojeção.

Como a aplicação do estudo de caso para o projeto preliminar foi reduzida a um subsistema específico, é importante discutir sobre a sua aplicação generalizada para todo o veículo. Neste sentido, torna-se ainda mais importante o uso de uma ferramenta computacional para organizar as análises, bem como uma possível utilização de algumas técnicas para reduzir o volume de trabalho. O uso de famílias de elementos de trabalho e o aproveitamento de dados e/ou análises poderia auxiliar o projetista para a condução do projeto preliminar.

Tanto para o projeto preliminar quanto para o projeto detalhado, a metodologia proposta está limitada como ferramenta de apoio ao projeto, não substituindo a competência do projetista em conduzi-lo. Esta mesma competência é crucial para a própria metodologia, devido às várias decisões e julgamentos da mesma.

5 Conclusões sobre a metodologia e sua aplicação

A primeira característica marcante de projetos de recuperação e modernização é que os mesmos trabalham um produto existente, que possui um passado de operação e cujo projeto original foi concebido a um tempo considerável. Estes fatores fazem com que um projeto de recuperação e modernização seja desenvolvido dentro de uma reengenharia de sistemas, termo adotado por Sage (2009) que envolve um estudo de engenharia reversa para a obtenção de seu próprio projeto, pois sobre o mesmo é desenvolvido o chamado “projeto de engenharia avante”. A metodologia proposta está alinhado com tal visão pois apresenta fases voltadas ao objetivo de buscar informações necessárias para as decisões de projeto, que são tomadas em cima de documentações e modelos, como a lista de materiais e as diversas DSM, ao longo do projeto preliminar e detalhado.

Além da recuperação do projeto, a metodologia proposta adota uma estratégia de construir a análise de modernização em cima do projeto original, observando-se suas alterações. Em sua fase de projeto detalhado, a metodologia proposta confirma as seguintes características de reengenharia de sistemas apontadas por Sage: aumento do entendimento sobre o produto, melhoria de índices de confiabilidade, manutenibilidade e funcionalidade, além de existir um peso significativo da manutenção dentro deste tipo de trabalho.

Uma avaliação do método de trabalho requer que o mesmo seja analisado em suas duas partes mais significativas: o projeto preliminar e o projeto detalhado.

5.1 Do projeto preliminar

Em relação à fase de projeto preliminar, observa-se na metodologia proposta uma intenção no resgate do projeto original, que é feito por intermédio da DSM. Obviamente, a riqueza de detalhes para as tomadas de decisão dependem da correção, granularidade e escopo da matriz. Em outras palavras, elaborar uma DSM realmente representativa é essencial. É necessário alocar corretamente as interações entre os componentes e, dependendo das alterações de engenharia propostas, pode ser preciso reajustar a DSM para que a mesma atenda ao

detalhamento exigido para o seu exame. Como verificado no desenvolvimento dos trabalhos, mesmo com uma grande simplificação do produto, reduzindo-o a 38 partes, a análise de risco desta DSM é trabalhosa e requer muitos cuidados na organização dos dados e resultados. Na prática, adotou-se um banco de dados ad-hoc para gerenciar estas informações. O banco de dados também serviu para a revisão das análises quando na avaliação das alternativas de modernização, principalmente ao se usar o recurso de comparação – não apenas da alternativa em relação ao projeto original mas em relação às demais alternativas. Resumindo, é bastante indicado o emprego de recursos de informática para facilitar os trabalhos da equipe de analistas durante esta análise.

Outra característica da metodologia, em sua fase de projeto preliminar, é a grande dependência da subjetividade dos analistas, devido às diversas decisões na fixação dos índices (severidade, ocorrência, fator de impacto). Tal característica é comum a métodos como o FMEA e o HAZOP quando empregados na quantificação de riscos. Em verdade, uma vez que há uma comparação entre os valores de NPRG, cujas diferenças entre as alternativas de projeto advêm das várias diferenças entre índices individuais, a subjetividade da metodologia proposta está mais relacionada ao julgamento de quão melhor ou pior as várias alterações de engenharia são em relação ao projeto original. Tal fato pode ser bastante influenciado pela própria motivação e entusiasmo em reprojetar determinado componente. É necessário um julgamento justo, racional e isento.

Como o método proposto para o projeto preliminar envolve uma análise de riscos aliada ao projeto em si, sua execução não se resume a procedimentos estanques, mas a um processo iterativo de ajustes dentro do ciclo análise e projeto. Informações advindas das análises de riscos podem subsidiar o projeto, modificando valores já atribuídos, trabalhando-se o perfil de risco global do produto, que é visualizado por intermédio da DSM. Examinando esta situação, é possível aplicar esta parte do método em um contexto diferente da comparação entre alternativas completas, mas na forma de um projeto centrado em riscos, no qual a reengenharia do produto (como alternativa única) vai sendo trabalhada dentro de um processo de gestão de riscos.

5.2 Do projeto detalhado

Como observado no caso exemplo, o resultado do projeto detalhado é sintetizado em informações sobre a classificação dos chamados elementos de trabalho, a definição dos mesmos em termos de projeto e as previsões iniciais de quantidades que serão empregadas dentro de um processo finito de produção.

5.2.1 Da classificação dos elementos de trabalho e o uso da taxa de reposição

A classificação dos elementos de trabalho é uma tentativa simples de relacionar um elemento de trabalho ao tipo de tratamento que receberá na fase produtiva. Como visto em sua apresentação e aplicação, esta classificação pode ser arbitrária ou resultada de análises específicas. Dentro das próprias análises, há diversos pontos onde pode haver subjetividade: na decisão sobre conveniência ou não do projeto, manutenção, suporte; na realização de análises de reprojeção; e na estimação de valores iniciais da taxa de reposição. Em geral, este processo depende da precisão de dados de entrada, da correta condução dos trabalhos e de uma boa organização.

Em relação às análises de expectativas de custos, que se valem de cálculos baseados em parâmetros de confiabilidade e em valores (estimados ou calculados) de custos e penalidades, observa-se que são adequadas às necessidades da gestão de materiais dentro de um processo finito de produção. O recurso de revisá-las com informações durante o quarto passo permite uma sistemática de atualização, principalmente dos valores de taxa de reposição, que se revela uma variável gerencial importante. De acordo com o modelo adotado dentro da metodologia proposta, admite-se que a taxa de reposição, que é uma proporção, obedeça às premissas da distribuição binomial. Dentre elas, é necessário que a proporção mantenha-se constante ao longo do tempo, o que pode representar uma limitação devido ao tempo de execução dos trabalhos da fase de produção. Tempos demasiados longos podem significar alteração na proporção de peças que necessitam de reposição.

Outro questionamento sobre a taxa de reposição é que a mesma depende de critérios sobre a aceitação ou não do aproveitamento da peça. Estes critérios são específicos de cada material, mas uma generalização pode ser estabelecida ao se analisar a contribuição do rigor com o qual tais testes são executados. Intuitivamente, quanto mais rigorosos forem os critérios de avaliação, maior será a taxa de reposição, o que causa uma tensão entre custos e qualidade. Em geral, após o processo de recuperação e modernização, são realizados testes para assegurar a eficácia da manutenção, o que serve como uma espécie de retroalimentação, o que ajuda ao estabelecimento de critérios mais realistas, mas que pode significar flutuações dentro dos valores de taxa de reposição e até mesmo a reclassificação do elemento de trabalho.

Resumidamente, a questão do emprego da taxa de reposição deve ser conduzida com cuidado tendo em vista a importância desta na análise de custos e nas suas adequações ao modelo binomial.

5.2.2 Da análise de reprojeto

A análise de reprojeto proposta é novamente uma aplicação da DSM. O objetivo do uso da matriz é uma tentativa de modelagem mais detalhada, observando-se dependência de projeto. Seu uso proposto é localizado, o que lhe traz limitações e cuidados concernentes a um bom detalhamento e construção que englobe acertadamente a parte do produto realmente afetada por alterações de engenharia.

O caráter localizado da análise de reprojeto durante a fase de projeto detalhado tem uma boa explicação: as questões mais globais sobre alterações de engenharia já foram analisadas dentro da fase de projeto preliminar. Neste ponto, a experiência advinda da execução no caso exemplo apresenta duas importantes observações:

1. É necessário aproveitar as análises do projeto preliminar dentro do projeto detalhado, se for o caso;

2. É preciso ter cuidado para que uma alteração de engenharia proposta no projeto detalhado possua um caráter local ou então será preciso refazer as análises do projeto preliminar afetadas por essa alteração.

5.3 Contribuições da metodologia proposta

A principal contribuição desta tese é a formalização de um estudo da recuperação e modernização como projeto específico, descrevendo suas características de uma forma a permitir a aplicação de um modelo baseado em risco. Dentro desta proposta, há uma série de pequenas contribuições que merecem destaque.

A primeira delas é o uso da DSM em conjunto com ferramentas de análise de riscos em duas situações diferentes:

1. Dentro de uma visão global, no contexto da análise de subsistemas/componentes, visando o cálculo de uma variável que permita avaliar uma alternativa de projeto;
2. Dentro de uma visão específica, no contexto da análise de elementos de trabalho. Estas duas aplicações evidenciam a utilidade da técnica DSM.

O emprego da DSM dentro do projeto preliminar também pode ser entendido como uma adaptação do modelo de Smaling e De Weck. Como mencionado no capítulo três, o modelo de Smaling e De Weck foi concebido para análise de riscos associados a novas tecnologias, o que não permite uma comparação rigorosa com a metodologia proposta. Entretanto, mesmo com tais observações, a ideia de ponderar a contribuição das alterações nas interações de acordo com a avaliação dos riscos é pertinente e poderia ser aplicado no modelo original dos autores.

6 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A presente tese possui como objetivo principal a proposição de um modelo de gestão técnica a ser implantado em projetos de recuperação e modernização de produtos. Tal objetivo foi atingido pela metodologia proposta, como se verifica em suas conclusões específicas, apresentadas no capítulo anterior.

Observa-se que a presente tese conduziu uma discussão que procurou agregar diversos assuntos relacionados ao seu tema, estabelecendo um referencial teórico para projetos de recuperação e modernização. Trata-se de uma área pouco explorada academicamente, de modo que esta obra já se configura como uma boa contribuição. Dentro deste contexto, esta tese empregou métodos de análises de riscos em conjunto de ferramentas e análises ligadas ao reprojeto, como a DSM.

Uma das questões mais importantes levantadas por esta obra é reconhecer a importância do peso da manutenção nos trabalhos de recuperação e modernização. Geralmente, grande parte do escopo de seus trabalhos é dedicado ao reaproveitamento de componentes. Neste sentido, além de levantar esta discussão, esta tese traz em seu método proposto o princípio de se definir o elemento de manutenção quanto à sua classificação e previsão de quantidade, por intermédio da obtenção e atualização de sua taxa de reposição dentro de uma análise de expectativas de custos.

Uma consequência natural da utilização do método para a elaboração de uma documentação técnica voltada para a recuperação e manutenção (DSM, lista de materiais, análises e informações das duas primeiras fases) é a possibilidade de revisão das variáveis empregadas nas tomadas de decisões. Pode-se afirmar que a ideia de “grande revisão” do produto (outro termo que definiria a recuperação) também se aplica às informações sobre o produto, produzindo uma boa base de conhecimento a ser aproveitada até o fim de sua vida útil.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A organização da metodologia proposta está centrada na figura da lista de materiais (BOM). Mesmo as análises DSM são aplicações que utilizam informações desta lista, de forma metódica. A lista de materiais de um projeto de recuperação e modernização possui informações sobre interações entre subsistemas/componentes/elementos de trabalho, confiabilidade, custos, penalidades, quantidades previstas, etc. A primeira sugestão para o prosseguimento desta tese tem a ver com sua aplicação neste contexto: é a elaboração de um sistema de informações gerenciais. Como verificado, muitas das análises são bastante extensas e trabalhosas, requerendo muita organização e cuidado na manipulação do conjunto de informações envolvidas.

A ideia de uma reengenharia do sistema presente em um processo de recuperação e modernização traz um interessante questionamento sobre até onde deve chegar o esforço de engenharia reversa – em termos de dedicação, custo e competências. O conhecimento e o esforço de engenharia necessários para realizar apenas uma manutenção ampla como a recuperação podem estar bem distante dos trabalhos para projetar um produto. Intuitivamente, ao se propor uma modernização durante a recuperação, é necessário encontrar um ponto de equilíbrio e este é um dos propósitos do método apresentado nesta tese. Isto pode ser percebido quando se verifica que há duas características bem empregadas no método, tanto na fase do projeto preliminar quanto na do detalhado:

1. A construção de uma base de conhecimento sobre o projeto original representada por uma DSM, que é analisada criticamente em termos de riscos;
2. A restrição de análises mais profundas e detalhadas apenas em torno das partes reprojatadas, seja como revisão das análises originais ou como busca de possíveis consequências que justifiquem a propagação da alteração de engenharia.

É a correção e riqueza das análises de riscos, bem como a necessidade percebida delas pela busca de dados que caracterizam o método como uma

tentativa de atingimento do ponto de equilíbrio de conhecimento necessário e suficiente para a reengenharia de um produto.

Outra característica bem marcante na diferenciação de um projeto de recuperação e modernização é o fato de que os seus trabalhos recaem sobre uma quantidade limitada de produtos. Neste sentido, dentro da metodologia proposta, a preocupação com tal quantidade “finita” dentro do método é evidenciada nas análises de expectativas de custos dos elementos de trabalho. Observa-se nas mesmas a importância da determinação de quantidades necessárias para a produção. Esta preocupação se mantém, conduzida pelo quarto passo do método, na busca pela revisão das variáveis empregadas como dados de entrada nas formulações.

Uma conclusão evidente do trabalho resultante da metodologia proposta é que a recuperação e modernização não se restringe apenas no produto, mas em também em sua documentação técnica. Há o resgate de informações e uma grande revisão, que se consolida nas planilhas de trabalho elaboradas durante a fase de projeto detalhado. Espera-se que, ao término da fase de produção, um sistema de gestão competente possua dados sobre as populações dos elementos de trabalho que compõem o produto.

Dentro do desenvolvimento de um sistema de informações gerenciais ou em outro tipo de trabalho visando prosseguir esta tese, um ponto interessante seria melhorar a transição das análises e resultados do projeto preliminar para o projeto detalhado, com o aproveitamento e a simplificação de informações.

De acordo com os comentários sobre as dificuldades de aplicação da metodologia, o caso exemplo foi desenvolvido empregando meios ad-hoc (banco de dados e planilhas eletrônicas), que serviram especificamente para a situação imposta. Reproduzir a metodologia para outros produtos significaria construir novamente tais recursos. A ideia de construção de um sistema ou software próprio para a metodologia, além de facilitar a sua aplicação, pode ser utilizada como um importante trabalho futuro, destinado a testar a metodologia para uma gama maior de produtos. Assim, as limitações verificadas neste trabalho pela aplicação específica em apenas um caso exemplo poderiam ser contornadas. Outra vantagem

evidente seria a possibilidade de evolução da metodologia, o que representaria importante contribuição para a pesquisa sobre reengenharia de sistemas.

Em relação à metodologia, particularmente quanto às análises do projeto preliminar, melhorias podem ser propostas no intuito de diminuir a subjetividade das análises. A aplicação de lógica difusa dentro do processo de decisão sobre os valores atribuídos nas análises pode ser bem-vinda, uma vez que representaria uma grande evolução que poderia empregar meios computacionais adequados. Esses meios podem tornar as análises mais céleres, além de facilitar análises de sensibilidade.

Também em relação ao projeto preliminar, poder-se-ia construir um método de projeto centrado na figura do NPRG com a análise de decisões que favorecem ou prejudicam esta grandeza. O principal motivo para este trabalho é procurar um quadro mais simples para o projetista, proporcionando decisões mais simples e diretas.

Um aperfeiçoamento natural da análise de expectativas de custos seria a incorporação de métodos de engenharia financeira mais apurados, em particular com a consideração do valor do dinheiro no tempo dentro das expectativas de custos associados à fase de operação. De forma semelhante, considerações financeiras poderiam compor um modelo de gestão de materiais, o que incluiria custos de posse dos estoques. Todas estas considerações levariam a um modelo mais preciso.

Dentro do estudo do caso exemplo, um modelo simples de atualização bayesiano foi apresentado superficialmente, à título de ilustração do quarto passo do método. Evidencia-se que uma proposta para trabalhos futuros seria o estudo de mais modelos bayesianos, no intuito de se conhecer as principais influências destes modelos para a metodologia proposta. Poder-se-ia testar, por exemplo, um modelo bayesiano baseado beta-binomial, muito utilizado na análise de proporções.

Tendo em vista que a gestão continuada de riscos durante a nova fase de operação do produto não pôde ser verificada, sendo apenas sugerida, esta verificação poderia também compor um ou mais trabalhos futuros. Tais trabalhos

poderiam ir mais além e avaliar os ganhos provenientes da metodologia proposta para a gestão de ativos durante a fase de operação, em decorrência de uma melhor estruturação das informações sobre o produto, dispostas como resultado das decisões da metodologia proposta nesta tese.

Referências

ARNOLD, R. S. Common Risks of Reengineering, **IEEE Comp. Sot. Rev. Eng. Newsletter**. v.1, n.2, 1992.

ASSIS, R. **Apoio à decisão em manutenção na gestão de activos**. Lisboa: Lidel, 2010.

ASSISTANT SECRETARY OF DEFENSE FOR LOGISTICS & MATERIEL READINESS. Página institucional. Washington. Disponível em <<http://www.acq.osd.mil>>. Acesso em 27 fev. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO 31000:2009 - Gestão de riscos - Princípios e diretrizes**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ABNT ISO 55000:2014 - Gestão de ativos — Visão geral, princípios e terminologia**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT ISO 55001:2014 - Gestão de ativos — Sistemas de gestão — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. **ABNT ISO 55002:2014 - Gestão de ativos — Sistemas de gestão — Diretrizes para a aplicação da ABNT NBR ISO 55001**. Rio de Janeiro, 2014b.

AVEN, T. On the new ISO guide on risk management terminology. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 96,n. 7, p. 719-726, 2011

AYENI, P., BAINES, T., LIGHTFOOT, H., BALL, P. State-of-the-art of 'Lean' in the aviation maintenance, repair, and overhaul industry. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, n. 11, pp. 2108-2123, 2011.

BARBOSA, G. E. C., **Recuperação e/ou modernização de máquinas: uma abordagem voltada à confiabilidade**. 2005. 188p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

BASTOS, E. C. S. **Blindados No Brasil - Um Longo e Árduo Aprendizado - Vol. 1**. Bauru: Taller Comunicação, 2012.

BERTHAUT, F., GHARBI, A.; PELLERIN, R. Joint hybrid repair and remanufacturing systems and supply control. **International Journal of Production Research**, v.48, n.14, p. 4101-4121, 2010.

BERTHAUT, F.; PELLERIN, R.; GHARBI, A. Control of a repair and overhaul system with probabilistic parts availability. **Production Planning and Control**, v. 20, n.1, p. 57-67, 2009.

BLANCHARD, B.; FABRYCKY, W. **Systems engineering and analysis**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 2006.

BOLSTAD, W. M. **Introduction to Bayesian statistics**. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2004.

BRASIL. Arsenal de Guerra de São Paulo. **Termo de referência do Pregão Eletrônico 020/2012**: contratação de serviços técnicos especializados em engenharia automotiva para desenvolvimento de projeto executivo de manutenção modificadora em Viaturas Blindadas. Barueri, 2012.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION - BSI. **PAS 55-1:2008**: Asset management part 1: specification for the optimized management of physical assets. Londres. 2008.

BROWNING, T. R. **Modeling and Analyzing Cost, Schedule, and Performance in Complex System Product Development**. 1998. Tese (Doutorado) - Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 1998.

_____. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v.48, n.3, p. 292-306, 2001.

BROWNING et al. Adding value in product development by creating information and reducing risk, **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 49, n. 4, pp. 443-458, 2002.

CARDOSO, I P. **Desenvolvimento de Método para Seleção de Políticas de Manutenção Baseado em Análise de Risco**. 2004. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

CHAPMAN, C. B.; Ward S. **Project risk management**. Wiltshire: John Wiley & Sons, 2003.

CHIKOFSKY, E.J. , CROSS, J.H.. Reverse engineering and design recovery: A taxonomy. **IEEE Software**, v.7, n.1, p. 13-17, 1990

DE WECK, O.; ROOS, D.;MAGEE, C. **Engineering systems**. Cambridge: MIT Press. 2012.

DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY - DAU. **Systems Engineering Fundamentals**. Fort Belvoir: 2001.

_____.Portal da universidade. Disponível em <<http://www.dau.mil>>. Acesso em 27 fev. 2013.

DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-1629** A Procedures for performing a failure mode effects and critically analysis FMEA. Washington, 1980.

_____. **MIL-STD-721C**, Military Standard: Definitions of terms for reliability and maintainability.Washington, 1981.

_____. **MIL-STD-499B**, Military Standard: System engineering management. Washington, 1993.

_____. **MIL-HDBK-338B** Electronic reliability design handbook. Washington, 1998.

_____. **MIL-HDBK-61B** Configuration management guidance. Washington, 2002.

ECKERT, C. et al. Change and customisation in complex engineering domains. **Research in Engineering Design**, v. 15, n.1, p. 1-21, 2004.

EGBU, C.O.; YOUNG, B. A.; TORRANCE, V. B. Planning and control processes and techniques for refurbishment management. **Construction Management and Economics**, v. 16, n. 3, pp. 315-325, 1998.

ENGESA. **Catálogo de peças do EE-11 Urutu Mil**. São José dos Campos, 1980

EPPPINGER, S. D.; BROWNING, T. R. **Design Structure Matrix Methods and Applications**. Cambridge: MIT Press, 2012.

ERDEN, M.S.et al. A review of function modeling: Approaches and applications. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM**, v.22, n.2, p. 147-169, 2008.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **IG 20-12** Instruções gerais para o modelo administrativo do ciclo de vida dos materiais de emprego militar. Brasília, 1994.

GARTHWAITE, P.; KADANE, J.; O'HAGAN, A. Statistical Methods for Eliciting Probability Distributions. **Journal of the American Statistical Association**, 100(470), pp.680-701, 2005.

GEE, W.A.. Systems engineering requirements for legacy DoD hardware upgrade and sustainment requirements definition, analysis, and validation, **2009 IEEE International Systems Conference Proceedings**, 2009.

GHARBI, A.; PELLERIN, R.; SADR, J. Production rate control for stochastic remanufacturing systems. **International Journal of Production Economics**, v. 112, n.1, p. 37-47, 2008.

GHARBI, A.; PELLERIN, R.; VILLENEUVE, L. Simulation approach for improving the strategic planning of overhaul industries, **IEEE Symposium on Emerging Technologies & Factory Automation, ETFA**, 1996.

GORGONE, R.G. Improving overhaul planning through risk assessment and risk management. **Journal of Ship Production**, v.8, n.4, p. 235-243, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 10.007** Quality management systems - guidelines for configuration management, Geneva, 2003.

IRESO, W.et al. **Handbook of reliability engineering and management**. New York: McGraw-Hill, 1998.

JARRATT, T.A.W. et al. Engineering change: An overview and perspective on the literature. **Research in Engineering Design**, v. 22, n.2, p. 103-124, 2011.

KECECIOGLU, D. **Reliability engineering handbook**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1991.

KIJIMA, M; SUMITA, U.A useful generalization of renewal theory: Counting process governed by non-negative Markovian increments. **Journal of Applied Probability**, v. 23, n. 1, p. 71-88, 1986.

KLETZ, T. Hazop – past and future. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 55, p. 263-266, 1997.

KOSSIAKOFF, A.et al. **Systems engineering**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2011.

KUMAMOTO, H. HENLEY, E. J. **Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists**. New York: IEEE Press, 1996. 597p.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2001. 388p

LEITCH, M. ISO 31000:2009 - The new international standard on risk management: Perspective. **Risk Analysis**, v.30, n.6, p. 887-892, 2010.

LEVESON, N. **Safeware**. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.

LOCK, R. Developing a methodology to support the evolution of System of Systems using risk analysis. **Systems Engineering**, v. 15, n.1, p. 62-73, 2012.

MAHAR, D. **Nonelectronic parts reliability data**. Reliability Information Analysis Center (RIAC): Utica, N.Y., 2011.

MARKESSET, T.; KUMAR, U. Integration of RAMS and risk analysis in product design and development work processes: A case study. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 9, n.4, p. 393-410, 2003.

MICHIE, D.; MUNDY, T. Start as you mean to go on: Gaining PAS-55 certification and embedding it in the organisation 2011, **IET Conference Publications**, 2011.

MOBLEY, R. et al. **Maintenance engineering handbook**. New York: McGraw-Hill, 2008.

MODARRES, M., **What every engineer should know about reliability and risk analysis**. New York: Marcel Drekker, 1993. 350p.

MONTAGUE, D. F. Process Risk Evaluation - What Method to Use? **Reliability Engineering and System Safety**, v. 29, p. 27 – 53, 1990.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Applied statistics and probability for engineers**. Hoboken: Wiley, 2011.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. New York: Industrial Press, 1997. 440p.

MOURA, M. C. et al. Avaliação bayesiana da eficácia da manutenção via processo de renovação generalizado. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n.3, p. 569-589, 2007.

NATIONAL AND AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **NASA Systems Engineering Handbook**. Washington, 2007.

_____. **NASA/SP-2011-3422** NASA Risk Management Handbook. Washington, 2011.

NITU, B. Design recommendations for modernization processes in machine and facility construction. **UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering**, v. 73, n.1, p. 263-279, 2011.

OEHMEN, J. et al. Risk management in product design: Current state, conceptual model and future research, **Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference**, 2010.

OTTO, K.N.; WOOD, K.L. Product Evolution: A Reverse Engineering and Redesign Methodology. **Research in Engineering Design**, v. 10, n.4, p. 226-243, 1998.

PASQUAL, M.C.; DE WECK, O.L. Multilayer network model for analysis and management of change propagation. **Research in Engineering Design**, v. 23, n.4, p. 305-328, 2012.

PATÉ-CORNELL, E. Finding and fixing systems weaknesses: Probabilistic methods and applications of engineering risk analysis. **Risk Analysis**, v. 22, n.2, p. 319-334, 2002.

PELLERIN, R. et al. A production rate control policy for stochastic repair and remanufacturing systems. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n.1, p. 39-48, 2009.

PHAM, H.; WANG, H. Imperfect maintenance. **European Journal of Operational Research**, v. 94, n.3, p. 425-438, 1996.

PIMMLER, T.U.; EPPINGER, S.D. Integration analysis of product decompositions. **American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division**, p. 343-351, 1994.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI. **Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos – Guia PMBOK**. 4.ed. USA, Pennsylvania, 2008.

PURDY, G. ISO 31000:2009 - Setting a new standard for risk management: Perspective. **Risk Analysis**, v. 30, n.6, p. 881-886, 2010.

PYSTER, A. et al. **Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) version 1.0**. Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology ©2012. Disponível em <<http://www.sebokwiki.org>>. Acesso em 5 dez. 2014.

RAUSAND, M. **Risk assessment: theory, methods, and applications**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

REVISTA VERDE-OLIVA. Brasília: Exército Brasileiro, 1973 - . Trimestral. N. 195, 2008

RIAC - The Reliability Information Analysis Center - RIAC. **Failure Mode/Mechanism Distribution (FMD-91)**. Rome, 1991.

_____. **Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)**. Rome, 1993.

SAGE, A. P. Systems Reengineering. In SAGE, A. P.; ROUSE, W. B. **Handbook of Systems Engineering and Management**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

_____. Systems engineering and systems management for reengineering. **The Journal of Systems and Software**, v. 30, p. 3-25, 1995.

SEACORD, R.; PLAKOSH, D.; LEWIS, G. **Modernizing legacy systems**. Boston: Addison-Wesley, 2003.

SHARMAN, D. M.; YASSINE, A. A. Characterizing complex product architectures. **Systems Engineering**, v. 7, n.1, p. 35-60, 2004.

SMALING, R.; DE WECK, O. Assessing risks and opportunities of technology infusion in system design. **Systems Engineering**, v. 10, n. 1, pp. 1-25, 2007.

SMITH, C. A. **Integrated Scenario-Based Methodology for Project Risk Management**. Tese (Doutorado). University of Maryland, 2011.

SOARES, R. M. **Palestra sobre o Programa de Revitalização de Viaturas Blindadas - Projeto Fênix**. Brasília, Arsenal de Guerra de São Paulo, 25 jul. 2012. Palestra proferida em seminário logístico do Ministério da Defesa. Brasília, 2012.

SÖDERHOLM, P.; HOLMGREN, M.; KLEFSJÖ, B. A process view of maintenance and its stakeholders. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 13, n. 1, p. 19-32, 2007.

SOUZA, F. M. **Impactos do supply chain management no planejamento e controle da produção: um estudo de caso na manutenção de viaturas blindadas Urutu do Exército Brasileiro**. Monografia (Especialização). Fundação Getúlio Vargas, 2012.

STEWART, D.V. Design structure system: a method for managing the design of complex systems. **IEEE Transactions on Engineering Management**, p. 71-74, 1981

STONE, R. B.; WOOD, K. L. Development of a functional basis for design. Journal of Mechanical Design, **Transactions Of the ASME**, v. 122, n.4, p. 359-370, 2000.

SUH, E.S et al. Technology infusion: Na assessment framework and case study, **Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference**, pp. 297, 2008.

TAKATA, S.et al. Maintenance: Changing role in life cycle management. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n.2, p. 643-655, 2004.

TANG, D. et al. Functional reverse design: Method and application, **Proceedings of the 2010 14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design**, 2010.

TANGEN, G.; FOSS, B.A. Decision support for planning upgrading of a hydropower plant, **Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, 1995.

THE DESIGN STRUCTURE MATRIX. Munique. Apresenta informações sobre DSM. Disponível em <<http://www.dsmweb.org>>. Acesso em 27 fev. 2013.

THE INSTITUTE OF ASSET MANAGEMENT - IAM. Página institucional. Disponível em <<http://theiam.org>>. Acesso em 27 fev. 2013.

THE INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING - INCOSE. **Systems Engineering Handbook** v. 3. San Diego, 2006.

UMEDA, Y.; TOMIYAMA, T.; YOSHIKAWA, H. FBS modeling: modeling scheme of function for conceptual design. **Proc. of the 9th Int. Workshop on Qualitative Reasoning**, 1995.

WOODHOUSE, J. **Managing industrial risk**. Londres: Chapman & Hall, 1993. 307p.

YAÑEZ, M.; JOGLAR, F.; MODARRES, M. Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience. **Reliability Engineering & System Safety**. V.77,p167-180, 2002.

ZIO, E. **An introduction to the basics of reliability and risk analysis**. Singapura: World Scientific, 2007.

Apêndice A – Componentes empregados no projeto preliminar no caso exemplo

Componente	Verbo + Objeto...	...Complemento	Descrição	Figura
Motor	Prover energia...	... mecânica, a partir do ciclo Diesel (compressão). Também provê energia elétrica, a partir do alternador.	Composto pelo motor propriamente dito e seus agregados, como alternador, bomba injetora e turbina. São agregados selecionados em função do motor.	1
Suporte do motor	Suportar motor...	... em sua posição, absorvendo deslocamentos	Composto pelo quadro e os suportes (coxins). São componentes fixados na carroceria.	1
Admissão de ar	Prover ar...	... com qualidade desejada, para admissão no motor.	Composto basicamente pelo filtro de ar e tubulação.	1
Admissão de combustível	Prover combustível...	... com qualidade desejada, para admissão no motor.	Composto pelos tanques e tubulações (exclui-se a bomba injetora).	1
Escapamento	Eliminar gases...	... da combustão do motor.	Composto pelo silencioso e tubulação.	2
Ventilador	Forçar fluxo de ar...	... para refrigeração do radiador e do motor.	Este componente é destacado do sistema de arrefecimento em virtude de sua possibilidade de modernização.	2
Arrefecimento	Resfriar o motor...	... mantendo sua temperatura dentro da faixa de funcionamento.	Composto pelo radiador e pelas tubulações, além de trocadores de calor.	2
Embreagem	Ligar/desligar movimento do motor...	... por comando do operador.	Composto da embreagem e de todo o circuito de acionamento. Este componente não existe na alternativa que conta com a caixa automática, sendo que suas funções são desempenhadas pela própria caixa.	2

(Continua)

Componente	Verbo + Objeto...	...Complemento	Descrição	Figura
Caixa de transmissão	Selecionar redução...	... do movimento do motor para o restante do trem de força.	Mecânica ou automática, o componente é composto pela caixa e pelo seu acionamento (trambulador).	2
Caixa de transferência	Transferir movimento aos diferenciais...	... quando acionado conveniente. Na verdade, permite ligar e desligar a tração dianteira, promovendo a tração total. Também possui uma seleção de velocidades (normal, neutra e reduzida).	Inclui a caixa e os mecanismos de acionamento, que são cilindros pneumáticos.	3
Diferencial dianteiro	Possibilitar movimento diferencial nas rodas dianteiras...	... quando o veículo realiza curvas.	O próprio componente.	4
Eixo dianteiro	Transmitir movimento do diferencial para as rodas dianteiras...	... quando acionado.	Composto pelas semiárvores que ligam o diferencial dianteiro às rodas.	5
Munhões	Suportar os cubos de rodas...	... possibilitando o movimento de esterçar as rodas.	O próprio componente.	5
Cubos de rodas dianteiras	Sustentar as rodas dianteiras...	... possibilitando o giro e a frenagem das rodas.	O próprio componente.	6
Suspensão dianteira	Absorver movimentos...	... mantendo a estabilidade da viatura	Composto pelos amortecedores e molas.	7
Rodas dianteiras	Prover tração e direção no solo...	...sob condições específicas.	Rodas, pneus e os anéis toroidais (anéis de borracha que são inseridos dentro dos pneus fins prover sustentação quando alvejados - pneus à prova de bala)	7
Freio dianteiro	Frear rodas dianteiras...	... sob condições específicas, quando acionado.	Composto pelo conjunto nas rodas. (tambores ou discos)	7

(Continuação)

Componente	Verbo + Objeto...	...Complemento	Descrição	Figura
Diferencial traseiro	Possibilitar movimento diferencial nas rodas traseiras...	... quando o veículo realiza curvas.	O próprio componente.	7
Eixo traseiro (boomerang)	Transmitir movimento do diferencial para as rodas traseiras e intermediárias...	... sob condições específicas.	Composto pelo boomerang sem o diferencial e a caixa de bloqueio.	7
Caixa de bloqueio	Possibilitar o bloqueio da função do diferencial traseiro...	... quando acionado.	Composto pelo componente e pelo seu acionamento por cilindro pneumático.	8
Cubos de rodas intermediários e traseiros	Sustentar as rodas intermediárias e traseiras...	... possibilitando o giro e a frenagem das rodas.	O próprio componente.	9
Suspensão traseira	Absorver movimentos...	... mantendo a estabilidade da viatura	Composto pelos amortecedores e molas.	9
Rodas intermediárias e traseiros	Prover tração no solo...	...sob condições específicas.	Rodas, pneus e os anéis toroidais (anéis de borracha que são inseridos dentro dos pneus fins prover sustentação quando alvejados - pneus à prova de bala)	9
Freios traseiros	Frear rodas traseiras e intermediárias...	... sob condições específicas, quando acionado.	Composto pelo conjunto nas rodas. (tambores ou discos)	9
Sistema elétrico	Funcionar componentes elétricos...	...sob condições específicas.	Compostos por todos componentes elétricos (fios, baterias, conectores, instrumentos, etc.) com exceção do alternador (agregado do motor).	9
Válvulas de comando	Acionar componentes pneumáticos.	... sob condições específicas, quando acionado pelo operador.	Componente submetido a modernização, razão de ser destacado do sistema pneumático.	10

(Continuação)

Componente	Verbo + Objeto...	...Complemento	Descrição	Figura
Direção	Prover direção...	... ao veículo, sob condições de segurança, conforme comando do operador.	Composto pela caixa de direção e por toda sua geometria, além da tubulação e reservatório hidráulicos. Não está incluso a bomba, agregado do motor.	11
Controle do freio	Controlar frenagem...	... sob condições específicas e seguras.	Composto pelo acionamento (pedal), reservatórios, amplificador (servo), cilindros mestres e toda tubulação até o conjunto das rodas.	11
Freio de estacionamento	Manter a viatura parada...	... quando estacionada.	Composto pela alavanca e pelo tambor, que no projeto original é colocado na caixa de transferência.	12
Ar comprimido	Fornecer ar comprimido...	... a determinadas vazão e pressão, sob condições específicas, para o funcionamento dos consumidores.	Exclui o compressor de ar, que é agregado do motor. Inclui o reservatório e as tubulações. Também não estão incluídos os acionadores e as válvulas de controle.	13
Carroceria	Prover forma...	... à viatura, acomodando seus componentes.	Compõem a carroceria propriamente dita, as portas e acessos (com exceção da porta dianteira e acesso ao motor) e os componentes associados a ela, que não sejam objeto de estudo sobre modernização.	13
Bomba de porão	Drenar água...	... que por ventura entre na carroceria, quando em navegação.	Composto pela bomba e pela tubulação.	14
Caixa de navegação	Transmitir movimento do motor para os hélices...	... sob condições específicas.	A caixa de navegação é um componente com uma entrada de força e duas saídas (para os hélices).	15
Hélices	Prover mobilidade durante navegação...	... sob condições específicas.	Composto pelos hélices, suportes e pelos eixos que ligam à caixa de navegação.	16

(Continuação)

Componente	Verbo + Objeto...	...Complemento	Descrição	Figura
Lemes	Prover direção durante navegação	... sob condições específicas e seguras.	Composto pelos lemes e pelo cabo de acionamento que é ligado na direção.	16
Prancha quebra-ondas	Reduzir o efeito de ondas...	... durante a navegação, melhorando a estabilidade do veículo na água.	Composto pela prancha e seu acionamento por cilindro pneumático.	16
Porta traseira	Prover acesso principal da tropa...	... sob condições específicas e seguras.	Destaca-se pela previsão de modernização que inclui um acionador para abertura e fechamento.	16
Cobertura do motor	Prover acesso ao motor ...	... sob condições específicas e seguras.	Não é uma simples tampa, pois dispõe de janelas que abrem e fecham por acionamento pneumático.	17
CTIS	Controlar pressão nos pneus...	... conforme controle do operador.	Composto pelos comandos, válvulas, instrumentos, tubulações e ligações às rodas.	18
Para-brisas	Proteger o operador...	... de vento e chuva quando em deslocamento.	O próprio componente.	19
Ar condicionado	Prover temperatura controlada...	... conforme controle do operador.	Composto pelo compressor, reservatório e demais componentes da tubulação e refrigeração.	*
(Conclusão)				

* Não representado

Fonte: autor.

Figura A. 1 - Perspectiva com o detalhamento da posição de alguns componentes do EE-11 Urutu.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 2 - Posição do motor, suporte do motor, embreagem, caixa de transmissão e admissão de ar.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 3 - Admissão de combustível.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 4 - Escapamento.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 5 – Arrefecimento e ventilador do arrefecimento.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 6 - Caixa de transferência.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 7 – Eixo dianteiro e demais componentes.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 8 - Componentes da suspensão dianteira.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 9 – Eixo traseiro e demais componentes.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 10 – Componentes da suspensão traseira.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 11 – Sistema elétrico e comandos eletro-pneumáticos.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 12 – Sistema de direção.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 13 – Controle do freio e freio de estacionamento.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 14 – Sistema de ar comprimido.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 15 - Bomba de porão.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 16 – Componentes da navegação.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 17 – Cobertura do motor.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 18 - Sistema de enchimento de pneus (CTIS).

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Figura A. 19 – Para-brisas (A) entre demais componentes.

Fonte: adaptado de Columbus (2014).

Referências:

COLUMBUS Comercial Importação Exportação Ltda. **Catálogo de peças do EE-11 Urutu M2**. São Paulo, 2014

Apêndice D – DSM da segunda configuração de modernização (A2) da análise do projeto preliminar do caso exemplo

componente		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
1	Motor	3	1,2	2		0,2	1,2	0,2	0,8	0,8	3,6	2,4	0,8	3	1,8	3											4		0,8	3		1,2	2,4										
2	Suporte do motor			1																									0,8	1,8													
3	Admissão de ar	0,4	0,4		4		0,4																																				
4	Admissão de combustível	0,8	1,6			4																																					
5	Escapamento		1			0,4																																					
6	Ventilador	0,6	2,4					4	4,8																																		
7	Arrefecimento	0,8	3,2						2,4			0,4	0,8																														
8	Embreagem		1	1,6						6		2,4																															
9	Caixa de transmissão										1,6	3,2	3	3																													
10	Caixa de transferência								0,4	0,8		2,4	1,6	3	2,4	1,6			2,4	1,6										2,4	0,8	0,8	0,4		0,6		2	2,4					
11	Diferencial dianteiro											2,4	1,2	2	1,6	3																											
12	Eixo dianteiro											3,2	2,4		3		2,4	2,4																									
13	Munhões													2	0,8													1,8	1,2														
14	Cubos de rodas dianteiras											0,8	3	1,2	2	3		2	2	2	2																						
15	suspensão dianteira															1,8																	1,6	2									
16	Rodas dianteiras															0,8	1,6		6														4							1,6	1,2		
17	Freio dianteiro														1,2	4			4											0,8	0,4												
18	Diferencial traseiro										1,6	1,6							2		2	1,2	1,6																				
19	Eixo traseiro (boomerang)																	1,6	1,6	2				1,2	1,6						0,8	0,4											
20	Caixa de bloqueio																	4	3,2		4										0,8	0,4											
21	Cubos de rodas intermediários/traseiros																				0,8	3		3		2	2	2	2														
22	Suspensão traseira																					0,4											1,6	2									
23	Rodas intermediárias/traseiros																					0,8	1,6		6								2,4							1,6	1,2		
24	Freios traseiros																						1,2	4		4				0,8	0,4											1,2	
25	Sistema elétrico																									4									2								
26	Válvulas de comando																											1,8			0,8	0,8											
27	Direção	0,4	0,8										0,6	2															2			0,8	1,2			0,8	2						
28	Controle do freio																1,2	2,4							1,2	2,4							0,4	0,6									
29	Freio de estacionamento										0,6	0,6														2,4																	
30	Ar comprimido	0,4	0,8								0,4	0,8									0,4	0,4	1,2	1,2					1,2		0,8		2,4						0,4	0,8	0,8	1,2	
31	Carroceria											1,2									0,6	1,8								0,6				3			0,2						
32	Bomba de porão																																		2								
33	Caixa de navegação										1,2	1,2																								3	1,2	2					
34	Hélices																															0,6	0,8			2	2		1,6				
35	Lemes																											0,4	0,8				0,4	0,8				3					
36	Prancha quebra-ondas																															1,6	0,4							3			
37	Porta traseira																															0,8	0,4	2						2			
38	Cobertura do motor																																3,6							3			
39	CTIS																0,8	0,8							0,8	0,8						0,8	0,4								3		
40	Para-brisas																																										3
Somatório de Ocorrência x Impacto:		29	4,2	4,6	5,6	5,8	10	16,2	12,4	9,6	23,2	11,6	11,4	7,8	16,2	3,6	12,2	14	16,4	9,6	11	13,4	3	12,2	14	8	3	12,4	10	6,2	19,8	28,6	4	11,6	4,8	5,8	5,4	7,8	4,6	16,6	3		
Somatório de Impacto:		9	2,6	1,4	2	2,6	2,4	4,2	2,6	3	9,2	4,2	3,8	3,8	5,6	2	4	5,2	6	4,2	3,8	5,2	2	4	5,2	1,8	1,2	5	4,4	2	8,2	10,4	2	5	2,2	2,4	2	3,6	1,8	7,4	1		
Média ponderada:		3,22	1,62	3,29	2,80	2,23	4,17	3,86	4,77	3,20	2,52	2,76	3,00	2,05	2,89	1,80	3,05	2,69	2,73	2,29	2,89	2,58	1,50	3,05	2,69	4,44	2,50	2,48	2,27	3,10	2,41	2,75	2,00	2,32	2,18	2,42	2,70	2,17	2,56	2,24	3,00		
Severidade máxima do componente		8	8	8	8	5	8	8	7	8	8	7	7	8	8	8	7	9	8	8	4	8	8	6	9	5	7	9	4	7	4	9	6	6	6	4	4	4	4	5	3		
NPR dos componentes:		25,78	12,92	26,29	22,40	11,15	33,33	30,86	33,38	25,60	20,17	19,33	21,00	16,42	23,14	14,40	21,35	24,23	21,87	18,29	11,58	20,62	12,00	18,30	24,23	22,22	17,50	22,32	20,45	12,40	16,90	11,00	18,00	13,92	13,09	14,50	10,80	8,67	10,22	11,22	9,00		
NPR da alternativa:		740,86																																									

Apêndice E – DSM da terceira configuração de modernização (A3) da análise do projeto preliminar do caso exemplo

[illegible]

Apêndice H – análises de interações das configurações

O presente apêndice apresenta os resultados das diversas análises de interações entre componentes nas configurações do caso exemplo. São relacionadas todas as análises da configuração original e apenas as análises das configurações de modernização onde há alteração de engenharia.

Tabela G.1 - Análises de interações da configuração original (A0)

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Motor	Motor	Projeto	transformar energia química em mecânica	não funciona	desgaste de componente internos	veículo não anda	3	1
Motor	Suporte do motor	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento do motor	empenamento	2	0,6
Motor	Suporte do motor	Energia	vibração mecânica	maior	falha nos coxins	quebra do suporte/motor	2	1
Motor	Admissão de ar	Energia	calor	maior	radiação/convecção	dano aos componentes da admissão	1	0,2
Motor	Admissão de combustível	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamentos	2	0,6
Motor	Admissão de combustível	Massa	contaminação	maior	sujeira em excesso	acúmulo de impurezas	1	0,2
Motor	Admissão de combustível	Energia	calor	maior	radiação/convecção	dano aos componentes da admissão	1	0,2
Motor	Escapamento	Energia	calor	maior	falha no isolamento térmico	dano aos componentes do sistema receptor	1	0,8
Motor	Escapamento	Física	folga	maior	vibração/dilatação/deslocamentos	escape de fumaça e ruído	2	0,4
Motor	Escapamento	Massa	fluxo de gases de escapamento	maior	problemas na mistura/queima	aumento do volume de gases/aquecimento	4	0,2
Motor	Ventilador	Energia	torque	maior	travamento ou atrito no eixo do hélice e forçamento do motor	quebra de componentes	3	0,8
Motor	Ventilador	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra de componentes	6	0,6
Motor	Arrefecimento	Massa	fluxo de água	menor	restrição	redução da capacidade de arrefecimento	4	0,6
Motor	Arrefecimento	Física	folga	maior	vazamento	perda de água/redução do arrefecimento	2	0,4
Motor	Arrefecimento	Energia	calor	maior	aquecimento excessivo do motor: problema de lubrificação/funcionamento forçado	redução da capacidade de arrefecimento	5	0,6
Motor	Embreagem	Energia	torque	maior	operação anormal do motor	desgaste do disco	5	0,6
Motor	Embreagem	Física	afastamento	maior	desgaste/uso inadequado do pedal/	desgaste do disco	3	0,6

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Motor	Sistema elétrico	Energia	eletricidade	nenhuma	falha no alternador	baixa autonomia do sistema elétrico	5	0,8
Motor	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Motor	Direção	Energia	pressão hidráulica	menor	falha na bomba/correia	direção dura	5	0,6
Motor	Direção	Massa	fluxo de óleo	menor	falha na bomba/correia	direção dura	3	0,6
Motor	Direção	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,4
Motor	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,6
Motor	Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	deficiência na compressão	perda de capacidade do sistema de AC	3	0,8
Motor	Ar comprimido	Massa	contaminação/umidade	maior	problema na filtragem/compressão	perda de qualidade do AC	3	0,4
Suporte do motor	Motor	Energia	não considerado				0	0
Suporte do motor	Motor	Física	não considerado				0	0
Suporte do motor	Suporte do motor	Projeto	suportar o motor	quebra	vibração/fadiga	mau posicionamento do motor	1	1
Suporte do motor	Carroceria	Energia	esforços estruturais	maior	operação anormal do motor	quebra/trinca	2	0,6
Suporte do motor	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Admissão de ar	Motor	Física	folga	maior	vibração/movimentos do veículo	entrada de contaminantes	2	0,2
Admissão de ar	Motor	Energia	temperatura	maior	condições ambientais	queda de rendimento	2	0,2
Admissão de ar	Motor	Massa	fluxo de ar	menor	obstrução do sistema	maior esforço do motor/queda de potência	5	0,4
Admissão de ar	Admissão de ar	Projeto	fornecer comburente para o motor	obstrução	sujeira em excesso	queda de rendimento	4	1
Admissão de ar	Escapamento	Física	folga	maior	vibração/ajuste da turbina	escape de fumaça e ruído	2	0,2
Admissão de ar	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Admissão de combustível	Motor	Física	folga	maior	vibração/movimentos do veículo	vazamentos/perda de potência/entrada de ar	2	0,4
Admissão de combustível	Motor	Energia	diferencial de pressão na aspiração do	menor	vazamento/entrada de ar	redução no desempenho/parada do motor	2	0,8

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
			combustível					
Admissão de combustível	Motor	Massa	fluxo de combustível	menor	obstrução do sistema	queda de rendimento	5	0,6
Admissão de combustível	Admissão de combustível	Projeto	fornecer combustível	vazamento	trinca/quebra de componentes	queda de rendimento/entrada de ar na linha de admissão	4	1
Admissão de combustível	Carroceria	Energia	não considerado				0	0
Admissão de combustível	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Escapamento	Motor	Energia	resistência pneumática	maior	obstrução do sistema	queda de rendimento	5	0,2
Escapamento	Motor	Física	não considerado				0	0
Escapamento	Admissão de ar	Energia	calor	maior	falha em isolamento térmico	dano aos componentes da admissão	2	0,2
Escapamento	Escapamento	Projeto	eliminar gases da combustão do motor de forma adequada	furo/vazamento de gases	corrosão	escape de fumaça e ruído	3	1
Escapamento	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ventilador	Motor	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	esforços acentuados	3	0,2
Ventilador	Motor	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento/aumento do atrito	queda de rendimento	6	0,4
Ventilador	Ventilador	Projeto	prover ventilação forçada	quebra	desbalanceamento de pá do hélice	inoperante	4	1
Ventilador	Arrefecimento	Massa	fluxo forçado de ar	menor	geometria dos hélices/rotação baixa	redução da capacidade de arrefecimento	6	0,8
Ventilador	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Arrefecimento	Motor	Energia	arrefecimento	menor	perda de fluido/redução de capacidade de arrefecimento	aumento da temperatura do motor/parada	4	0,8
Arrefecimento	Motor	Massa	fluxo de água fria	menor	obstrução/entupimento	aumento da temperatura do motor/parada	4	0,8
Arrefecimento	Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,4
Arrefecimento	Arrefecimento	Projeto	arrefecer componentes	não arrefecimento	quantidade insuficiente de líquido refrigerante	redução da capacidade de arrefecimento	3	0,8

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Arrefecimento	Caixa de transferência	Energia	arrefecimento	menor	baixo nível de óleo	aquecimento/perda de componentes	2	0,4
Arrefecimento	Caixa de transferência	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Arrefecimento	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Embreagem	Motor	Energia	resistência ao movimento	maior	operação anormal do motor	quebra de componentes	4	0,4
Embreagem	Motor	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	dano a componentes	5	0,2
Embreagem	Embreagem	Projeto	ligar/desligar transmissão de movimento à caixa de mudanças	desgaste do disco	uso prolongado	não controla devidamente a transmissão de movimento	6	1
Embreagem	Caixa de transmissão	Energia	torque	menor	desgaste no disco da embreagem	redução de desempenho do veículo	4	0,6
Embreagem	Caixa de transmissão	Física	não considerado				0	0
Caixa de transmissão	Embreagem	Energia	resistência ao movimento	maior	redução/operação anormal	desgaste do disco	4	0,4
Caixa de transmissão	Embreagem	Física	não considerado				0	0
Caixa de transmissão	Caixa de transmissão	Projeto	prover redução mecânica selecionada pelo motorista	não engrenamento	desgaste/defeito em componentes internos	não é possível selecionar marcha	4	0,8
Caixa de transmissão	Caixa de transferência	Energia	torque	maior	operação forçada	quebra do cardã	3	1
Caixa de transmissão	Caixa de transferência	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	1
Caixa de transferência	Arrefecimento	Energia	calor	maior	aquecimento excessivo do componente: problema de lubrificação/funcionamento forçado	redução da capacidade de arrefecimento	2	0,4
Caixa de transferência	Arrefecimento	Física	folga	maior	vazamento	perda de óleo/redução do arrefecimento	2	0,2
Caixa de transferência	Arrefecimento	Massa	fluxo de óleo	menor	restrição	redução da capacidade de arrefecimento	4	0,4

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Caixa de transferência	Caixa de transmissão	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrimento/operação	quebra do cardã	2	0,8
Caixa de transferência	Caixa de transmissão	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	0,8
Caixa de transferência	Caixa de transferência	Projeto	prover redução mecânica	não funcionamento	quebra de componente interno	veículo não anda	3	1
Caixa de transferência	Diferencial dianteiro	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cardã	2	0,8
Caixa de transferência	Diferencial dianteiro	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	0,8
Caixa de transferência	Diferencial traseiro	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	0,8
Caixa de transferência	Diferencial traseiro	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cardã	2	0,8
Caixa de transferência	Freio de estacionamento	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste de componentes	não acionamento/acionamento parcial	3	0,8
Caixa de transferência	Freio de estacionamento	Energia	calor	maior	atrimento	sobreaquecimento/fragilização	4	0,2
Caixa de transferência	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrimento/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Caixa de transferência	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de transferência	Carroceria	Energia	esforços estruturais	maior	operação anormal do motor	quebra/trinca	1	0,6
Caixa de transferência	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Caixa de transferência	Bomba de porão	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra da bomba	5	1
Caixa de transferência	Bomba de porão	Energia	torque	nenhum	problema no engrenamento	não funcionamento da bomba	5	1
Caixa de transferência	Caixa de navegação	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	1
Caixa de transferência	Caixa de navegação	Energia	torque	menor	engrenamento insuficiente	não funcionamento do componente	2	0,8
Diferencial dianteiro	Caixa de transferência	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrimento/operação	quebra do cardã	2	0,6
Diferencial dianteiro	Caixa de	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	4	0,6

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
	transferência		gem					
Diferencial dianteiro	Diferencial dianteiro	Projeto	permitir diferença de rotação nas rodas dianteiras	quebra de componentes internos	desgaste/falta de manutenção/flata de lubrificação	quebra do diferencial	2	1
Diferencial dianteiro	Eixo dianteiro	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do eixo	3	1
Diferencial dianteiro	Eixo dianteiro	Física	alinhamento/monta gem	errado	movimento/vibração	forçamento/empenamento do eixo	4	0,4
Eixo dianteiro	Diferencial dianteiro	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cardã	3	0,8
Eixo dianteiro	Diferencial dianteiro	Física	alinhamento/monta gem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	4	0,8
Eixo dianteiro	Eixo dianteiro	Projeto	transmitir movimento rotativo	quebra de componentes internos	fadiga	redução no desempenho/perda da capacidade de tração total	3	1
Eixo dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Física	folga	errado	movimento/vibração	vibração/quebra de estria	4	0,6
Eixo dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cubo	3	0,8
Munhões	Eixo dianteiro	Física	não considerado				0	0
Munhões	Munhões	Projeto	permitir o movimento do cubo	quebra/trinca/da no estrutural	fadiga/impacto	parada imediata do veículo	2	1
Munhões	Cubos de rodas dianteiras	Física	alinhamento/monta gem	errado	movimento/vibração	desbalanceamento	2	0,4
Munhões	suspensão dianteira	Energia	não considerado				0	0
Munhões	suspensão dianteira	Física	não considerado				0	0
Munhões	Direção	Física	alinhamento/monta gem	errado	movimento/vibração	direção dura	3	0,6
Munhões	Direção	Energia	resistência ao movimento	maior	operação indevida/terreno	quebra de componentes	2	0,6
Cubos de rodas dianteiras	Eixo dianteiro	Física	alinhamento/monta gem	errado	movimento/vibração	forçamento/empenamento do eixo	2	0,4
Cubos de rodas dianteiras	Eixo dianteiro	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do eixo	2	1
Cubos de rodas dianteiras	Munhões	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra da fixação	2	1

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Cubos de rodas dianteiras	Munhões	Física	alinhamento/montagem	errado	afrouxamento dos parafusos de fixação	esforços excessivos	2	0,6
Cubos de rodas dianteiras	Cubos de rodas dianteiras	Projeto	transmitir movimento rotativo/frenagem às rodas	quebra	fadiga	parada imediata do veículo	3	1
Cubos de rodas dianteiras	Rodas dianteiras	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra da fixação	2	1
Cubos de rodas dianteiras	Rodas dianteiras	Física	alinhamento/montagem	errado	má fixação	quebra da fixação	2	1
Cubos de rodas dianteiras	Freio dianteiro	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste	redução no desempenho de frenagem	3	1
Cubos de rodas dianteiras	Freio dianteiro	Energia	atrito	menor	presença de água	redução no desempenho de frenagem	3	1
suspensão dianteira	Munhões	Física	não considerado				0	0
suspensão dianteira	Munhões	Energia	não considerado				0	0
suspensão dianteira	suspensão dianteira	Projeto	prover conforto e segurança	falha de amortecimento	amortecedor vencido	desconforto/prejuízo à estabilidade	3	0,6
suspensão dianteira	Carroceria	Física	alinhamento/montagem	errado	operação anormal do veículo	quebra/trinca	2	0,8
suspensão dianteira	Carroceria	Energia	força	maior	operação anormal do veículo	quebra/trinca	2	1
Rodas dianteiras	Cubos de rodas dianteiras	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	desbalanceamento	2	0,4
Rodas dianteiras	Cubos de rodas dianteiras	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cubo	2	0,8
Rodas dianteiras	Rodas dianteiras	Projeto	prover movimento em relação ao solo	trinca nas rodas	fadiga	inutilização do componente	6	1
Rodas dianteiras	Carroceria	Física	afastamento	nenhum	curso longo do movimento roda	impacto/incômodo	10	0,4
Freio dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Física	afastamento	maior	desgaste das lonas	dificuldade de frenagem	3	0,6
Freio dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Energia	calor	maior	frenagem continuada	quebra do cubo	5	1
Freio dianteiro	Freio dianteiro	Projeto	freiar o veículo	não funcionamento	desgaste de componentes	veículo não freia	8	1
Freio dianteiro	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Freio dianteiro	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Freio dianteiro	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2
Diferencial traseiro	Caixa de transferência	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrito/operação	quebra do cardã	2	0,8
Diferencial traseiro	Caixa de transferência	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	0,8
Diferencial traseiro	Diferencial traseiro	Projeto	permitir diferença de rotação nas rodas dianteiras	quebra de componentes internos	desgaste/falta de manutenção/flata de lubrificação	quebra do diferencial	2	1
Diferencial traseiro	Eixo traseiro (boomerang)	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do eixo	2	1
Diferencial traseiro	Eixo traseiro (boomerang)	Física	não considerado				0	0
Diferencial traseiro	Caixa de bloqueio	Energia	força quando acionado	maior	operação extrema	quebra	2	0,8
Diferencial traseiro	Caixa de bloqueio	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	forçamento	3	0,4
Eixo traseiro (boomerang)	Diferencial traseiro	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	0,8
Eixo traseiro (boomerang)	Diferencial traseiro	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cardã	2	0,8
Eixo traseiro (boomerang)	Eixo traseiro (boomerang)	Projeto	transmitir movimento rotativo	quebra de componentes internos	desgaste/falta de manutenção/flata de lubrificação	parada imediata do veículo	2	1
Eixo traseiro (boomerang)	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Física	folga	errado	movimento/vibração	vibração/quebra de estria	2	0,6
Eixo traseiro (boomerang)	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cubo	2	0,8
Eixo traseiro (boomerang)	Suspensão traseira	Física	não considerado				0	0
Eixo traseiro (boomerang)	Suspensão traseira	Energia	não considerado				0	0
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Caixa de bloqueio	Diferencial traseiro	Física	acionamento	errado	movimento/vibração	quebra do diferencial	4	1
Caixa de bloqueio	Diferencial traseiro	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cardã	4	0,8
Caixa de bloqueio	Caixa de bloqueio	Projeto	Bloquear diferencial traseiro	não acionamento	vazamento interno	diferencial não bloqueia	5	0,8
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Eixo traseiro (boomerang)	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do eixo	2	1
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Eixo traseiro (boomerang)	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	forçamento/empenamento do eixo	2	0,4
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Projeto	transmitir movimento rotativo/frenagem às rodas	quebra	fadiga	parada imediata do veículo	3	1
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Rodas intermediárias/traseiros	Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra da fixação	2	1
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Rodas intermediárias/traseiros	Física	alinhamento/montagem	errado	má fixação	quebra da fixação	2	1
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Freios traseiros	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste	redução no desempenho de frenagem	3	1
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Freios traseiros	Energia	atrito	menor	presença de água	redução no desempenho de frenagem	3	1
Suspensão traseira	Eixo traseiro (boomerang)	Energia	não considerado				0	0
Suspensão traseira	Eixo traseiro (boomerang)	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	forçamento	2	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Suspensão traseira	Suspensão traseira	Projeto	prover conforto e segurança	falha de amortecimento	amortecedor vencido	desconforto/prejuízo à estabilidade	2	0,6
Suspensão traseira	Carroceria	Energia	força	maior	operação anormal do veículo	quebra/trinca	2	1
Suspensão traseira	Carroceria	Física	alinhamento/montagem	errado	operação anormal do veículo	quebra/trinca	2	0,8
Rodas intermediárias/traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	desbalanceamento	2	0,4
Rodas intermediárias/traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cubo	2	0,8
Rodas intermediárias/traseiros	Rodas intermediárias/traseiros	Projeto	prover movimento em relação ao solo	trinca nas rodas	fadiga	inutilização do componente	6	1
Rodas intermediárias/traseiros	Carroceria	Física	afastamento	nenhum	movimento exagerado	impacto/incômodo	6	0,4
Freios traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Energia	calor	maior	frenagem continuada	quebra do cubo	5	1
Freios traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Física	afastamento	maior	desgaste das lonas	dificuldade de frenagem	3	0,6
Freios traseiros	Freios traseiros	Projeto	freiar o veículo	não funcionamento	desgaste de componentes	veículo não freia	8	1
Freios traseiros	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2
Freios traseiros	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Freios traseiros	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Sistema elétrico	Motor	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Motor	Energia	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Sistema elétrico	Projeto	prover funcionamento de seus componentes	pane	curto circuito em componente	não funcionamento do sistema	6	1

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Sistema elétrico	Válvulas de comando	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Válvulas de comando	Energia	eletricidade	menor/nenhum	pane no sistema elétrico	não funcionamento	6	1
Sistema elétrico	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Carroceria	Energia	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de transferência	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de transferência	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de bloqueio	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de bloqueio	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Válvulas de comando	Projeto	proporcionar comando no acionamento de atuadores	emperramento	corrosão	não funcionamento	7	1
Válvulas de comando	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Válvulas de comando	Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	vazamento	perda de capacidade de acionamento	2	0,4
Válvulas de comando	Ar comprimido	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/mau posicionamento da válvula	perda de capacidade de acionamento	4	0,4
Válvulas de comando	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Prancha quebra-ondas	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Prancha quebra-ondas	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Cobertura do motor	Física	não considerado				0	0
Válvulas de	Cobertura do motor	Massa	não considerado				0	0

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
comando								
Direção	Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Direção	Motor	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/uso indevido	quebra da bomba	2	0,4
Direção	Motor	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	restrição/obstrução	maior esforço da bomba	2	0,4
Direção	Munhões	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	esforços excessivos	3	0,2
Direção	Munhões	Energia	força	maior	operação indevida/terreno	quebra de suporte	2	1
Direção	Direção	Projeto	direcionar o veículo	quebra de componentes internos	esforços/operação indevida	veículo sem direção	2	1
Direção	Carroceria	Energia	esforços estruturais	maior	operação anormal do veículo	quebra/trinca	2	0,6
Direção	Carroceria	Física	alinhamento/montagem	errado	operação anormal do veículo	quebra/trinca	2	0,4
Direção	Lemes	Energia	força	maior	operação anormal do veículo	quebra de componentes	2	1
Direção	Lemes	Física	alinhamento/montagem	errado	desregulagem	esforço excessivo/operação ineficiente	2	0,4
Controle do freio	Freio dianteiro	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freio dianteiro	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio	Freio dianteiro	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freios traseiros	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freios traseiros	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freios traseiros	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio	Controle do freio	Projeto	controlar frenagem	perda de fluido	falha em vedação/vazamento	redução no desempenho/acionamento difícil	3	1
Controle do freio	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	3	0,2
Controle do freio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Controle do freio	Carroceria	Física	não considerado	errado	movimento/vibração	esforço excessivo/operação ineficiente	0	0
Freio de estacionamento	Caixa de transferência	Energia	resistência ao movimento	maior	acionamento parcial ou indevido	maior esforço	3	0,2
Freio de estacionamento	Caixa de transferência	Física	afastamento quando desacionado	menor	posição indevida da alavanca	maior esforço	3	0,2
Freio de estacionamento	Freio de estacionamento	Projeto	manter o veículo imóvel	não acionamento	desgaste de componentes	veículo não se mantém parado quando estacionado	3	1
Freio de estacionamento	Carroceria	Física	não considerado	errado	movimento/vibração	esforço excessivo/operação ineficiente	0	0
Ar comprimido	Motor	Energia	resistência pneumática	maior	obstrução/uso indevido	quebra do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Motor	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	restrição/obstrução	maior esforço do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Ar comprimido	Caixa de transferência	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão do sistema	mau acionamento/mau engrenamento	2	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	baixa pressão/vazamento	mau acionamento/mau engrenamento	4	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Física	folga	maior	movimento/vibração	baixa pressão/vazamento	2	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Física	folga	maior	movimento/vibração	sobrepessão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	sobrepessão insuficiente durante a navegação	4	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema	sobrepessão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Energia	pressão pneumática	menor	pressão baixa no sistema	não acionamento/acionamento pela metade	2	0,6
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/não acionamento/acionamento pela metade	2	0,6
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	pressão baixa no sistema	movimento lento	4	0,6
Ar comprimido	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Ar comprimido	Válvulas de comando	Massa	não considerado				0	0
Ar comprimido	Válvulas de comando	Física	folga	maior	desgaste da vedação	funcionamento irregular	2	0,6
Ar comprimido	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Ar comprimido	Controle do freio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/baixa pressão	redução no desempenho	4	0,6
Ar comprimido	Ar comprimido	Projeto	transmissão de energia por meio de ar comprimido	vazamento	danos físicos de componentes/folgas	redução no desempenho	5	0,8
Ar comprimido	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	mau acionamento/acionamento parcial	3	0,4
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Física	folga	errado	movimento/vibração	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,2
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,4
Carroceria	Suporte do motor	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Suporte do motor	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Admissão de ar	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Admissão de combustível	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Escapamento	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Ventilador	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Arrefecimento	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Caixa de transferência	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Caixa de transferência	Energia	vibração	maior	movimento do veículo	deslocamento/desalinhamento de componentes	1	0,2
Carroceria	suspensão dianteira	Física	afastamento	nenhum	fim do curso/deslocamento excessivo	quebra de componentes	2	0,4

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Carroceria	suspensão dianteira	Energia	força	maior	operação indevida	quebra de componentes	1	1
Carroceria	Rodas dianteiras	Energia	força/batida pelo curso	maior	falha de projeto	impacto/forçamento/quebra	10	0,8
Carroceria	Suspensão traseira	Física	afastamento	nenhum	fim do curso/deslocamento excessivo	quebra de componentes	2	0,4
Carroceria	Suspensão traseira	Energia	força	maior	operação indevida	quebra de componentes	1	1
Carroceria	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Direção	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	direção dura	1	0,6
Carroceria	Direção	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Controle do freio	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Freio de estacionamento	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Ar comprimido	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Carroceria	Projeto	prover estrutura integra para comportar componentes dentro de um ambiente fechado	quebra/trinca	impactos	falha estrutural	3	1
Carroceria	Bomba de porão	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Caixa de navegação	Energia	vibração	maior	movimento do veículo	deslocamentos	1	0,2
Carroceria	Caixa de navegação	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Hélices	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Hélices	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Lemes	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Lemes	Energia	não considerado				0	0

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Carroceria	Prancha quebra-ondas	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Porta traseira	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	não fechamento da porta	2	1
Carroceria	Cobertura do motor	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	falha na vedação	2	0,8
Bomba de porão	Caixa de transferência	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	0,6
Bomba de porão	Caixa de transferência	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento da bomba	quebra do cardã	2	0,6
Bomba de porão	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Bomba de porão	Projeto	drenar água em navegação	não funciona	travamento	não funcionamento da bomba	4	1
Caixa de navegação	Caixa de transferência	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	0,6
Caixa de navegação	Caixa de transferência	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrito/operação	quebra do cardã	2	0,6
Caixa de navegação	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Caixa de navegação	Carroceria	Energia	não considerado				0	0
Caixa de navegação	Caixa de navegação	Projeto	prover redução mecânica em navegação	não funciona	quebra de componentes internos	veículo não navega	3	1
Caixa de navegação	Hélices	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	esforço excessivo/operação ineficiente	3	0,4
Caixa de navegação	Hélices	Energia	torque	maior	operação indevida	quebra do hélice	2	1
Hélices	Carroceria	Energia	esforços estruturais	maior	travamento/restrição do hélice	quebra de suporte	2	0,4
Hélices	Carroceria	Física	folga	maior	movimento/vibração	incômodo	3	0,2
Hélices	Caixa de navegação	Energia	resistência ao movimento	maior	obstrução/travamento do hélice	quebra do cardã	2	1
Hélices	Caixa de navegação	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	1
Hélices	Hélices	Projeto	prover propulsão em navegação	desbalanceamento	dano à pá do hélice	esforços excessivos	2	0,8
Lemes	Direção	Energia	resistência ao movimento	maior	operação indevida/terreno	quebra de componentes	2	0,4

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Lemes	Direção	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	direção dura	2	0,2
Lemes	Carroceria	Física	folga	maior	movimento/vibração	incômodo	2	0,2
Lemes	Carroceria	Energia	esforços estruturais	maior	travamento/restrrição do hélice	quebra de suporte	2	0,4
Lemes	Lemes	Projeto	prover direção em navegação	quebra do cabo de aço de transmissão	esforços	leme sem direção	3	1
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	4	0,4
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrrição	redução no desempenho	2	0,2
Prancha quebra-ondas	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Prancha quebra-ondas	Prancha quebra-ondas	Projeto	prover geometria em navegação	quebra	uso indevido	inorperância na navegação	3	1
Porta traseira	Carroceria	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	falha na vedação	2	1
Porta traseira	Porta traseira	Projeto	prover vedação	falha na vedação	desgaste de componentes	entrada de água quando na navegação	1	1
Cobertura do motor	Carroceria	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	falha na vedação	6	0,6
Cobertura do motor	Cobertura do motor	Projeto	prover vedação	falha na vedação	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	inundação compartimento do motor quando em navegação	3	1

Fonte: autor.

Tabela G.2 - Análises de interações da configuração A1 (apenas interações revistas).

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Motor	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Motor	Sistema elétrico	Energia	eletricidade	nenhuma	falha no alternador	baixa autonomia do sistema elétrico	5	0,8
Motor	Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	deficiência na compressão	perda de capacidade do sistema de AC	3	0,8
Motor	Ar comprimido	Massa	contaminação/umidade	maior	problema na filtragem/compressão	perda de qualidade do AC	3	0,4
Motor	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,6
Caixa de transferência	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de transferência	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Freio dianteiro	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Freio dianteiro	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2
Freio dianteiro	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Freios traseiros	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Freios traseiros	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Freios traseiros	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2
Sistema elétrico	Motor	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Motor	Energia	não considerado				0	0

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Sistema elétrico	Sistema elétrico	Projeto	prover funcionamento de seus componentes	pane	curto circuito em componente	não funcionamento do sistema	4	1
Sistema elétrico	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Carroceria	Energia	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Bomba de porão	Energia	tensão	nenhum	pane no sistema elétrico	não funcionamento da bomba	2	1
Válvulas de comando	Caixa de transferência	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de transferência	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de bloqueio	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de bloqueio	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Válvulas de comando	Projeto	proporcionar comando no acionamento de atuadores	vazamento	desgaste da vedação	funcionamento irregular	3	0,6
Válvulas de comando	Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	vazamento	perda de capacidade de acionamento	2	0,4
Válvulas de comando	Ar comprimido	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/mau posicionamento da válvula	perda de capacidade de acionamento	3	0,4
Válvulas de comando	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Válvulas de comando	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Prancha quebradas	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Prancha quebradas	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Cobertura do motor	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Cobertura do motor	Massa	não considerado				0	0
Controle do freio	Freio dianteiro	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução no desempenho da frenagem	3	0,8

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Controle do freio	Freio dianteiro	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freio dianteiro	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio	Freios traseiros	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freios traseiros	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freios traseiros	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio	Controle do freio	Projeto	controlar frenagem	perda de fluido	falha em vedação/vazamento	redução no desempenho/acionamento difícil	2	1
Controle do freio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,2
Controle do freio	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	3	0,2
Controle do freio	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ar comprimido	Motor	Energia	resistência pneumática	maior	obstrução/uso indevido	quebra do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Ar comprimido	Motor	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	restrição/obstrução	maior esforço do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Física	folga	maior	movimento/vibração	baixa pressão/vazamento	2	0,2
Ar comprimido	Caixa de transferência	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	baixa pressão/vazamento	mau acionamento/mau engrenamento	3	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão do sistema	mau acionamento/mau engrenamento	2	0,4
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema	sobrepresão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Física	folga	maior	movimento/vibração	sobrepresão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	sobrepresão insuficiente durante a navegação	3	0,2
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	pressão baixa no sistema	movimento lento	3	0,6
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/não	2	0,6

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
						acionamento/acionamento pela metade		
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Energia	pressão pneumática	menor	pressão baixa no sistema	não acionamento/acionamento pela metade	2	0,6
Ar comprimido	Válvulas de comando	Física	folga	maior	desgaste da vedação	funcionamento irregular	2	0,6
Ar comprimido	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0
Ar comprimido	Válvulas de comando	Massa	não considerado				0	0
Ar comprimido	Controle do freio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/baixa pressão	redução no desempenho	4	0,6
Ar comprimido	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Ar comprimido	Ar comprimido	Projeto	transmissão de energia por meio de ar comprimido	vazamento	danos físicos de componentes/folgas	redução no desempenho	3	0,8
Ar comprimido	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,4
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Física	folga	errado	movimento/vibração	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,2
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	mau acionamento/acionamento parcial	3	0,4
Carroceria	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Controle do freio	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Ar comprimido	Física	não considerado				0	0

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Carroceria	Bomba de porão	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Bomba de porão	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Bomba de porão	Projeto	drenar água em navegação	não funciona	travamento	não funcionamento da bomba	2	1
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	4	0,4
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2

Fonte: autor

Tabela G.3 - Análises de interações da configuração A2 (apenas interações revistas).

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Motor	Sistema elétrico	Energia	eletricidade	nenhuma	falha no alternador	baixa autonomia do sistema elétrico	5	0,8
Motor	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Motor	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,6
Motor	Ar comprimido	Massa	contaminação/umidade	maior	problema na filtragem/compressão	perda de qualidade do AC	3	0,4
Motor	Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	deficiência na compressão	perda de capacidade do sistema de AC	3	0,8
Caixa de transferência	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de transferência	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Cubos de rodas dianteiras	Freio dianteiro	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste	redução no desempenho de frenagem	2	1
Cubos de rodas dianteiras	Freio dianteiro	Energia	atrito	menor	presença de água	redução no desempenho de frenagem	2	1
Rodas dianteiras	CTIS	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,8
Rodas dianteiras	CTIS	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	redução no desempenho	2	0,6
Rodas dianteiras	CTIS	Energia	pressão	maior	obstrução/entupimento	redução no desempenho	2	0,6
Freio dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Energia	calor	maior	frenagem continuada	quebra do cubo	4	1
Freio dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Física	afastamento	maior	desgaste das pastilhas	dificuldade de frenagem	2	0,6
Freio dianteiro	Freio dianteiro	Projeto	freiar o veículo	não funcionamento	desgaste de componentes	veículo não freia	4	1
Freio dianteiro	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Freio dianteiro	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Freio dianteiro	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Freios traseiros	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste	redução no desempenho de frenagem	2	1
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Freios traseiros	Energia	atrito	menor	presença de água	redução no desempenho de frenagem	2	1
Rodas intermediárias/traseiros	CTIS	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,8
Rodas intermediárias/traseiros	CTIS	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	redução no desempenho	2	0,6
Rodas intermediárias/traseiros	CTIS	Energia	pressão	maior	obstrução/entupimento	redução no desempenho	2	0,6
Freios traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Física	afastamento	maior	desgaste das pastilhas	dificuldade de frenagem	2	0,6
Freios traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Energia	calor	maior	frenagem continuada	quebra do cubo	4	1
Freios traseiros	Freios traseiros	Projeto	freiar o veículo	não funcionamento	desgaste de componentes	veículo não freia	4	1
Freios traseiros	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de	2	0,4

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
						capacidade		
Freios traseiros	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Freios traseiros	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2
Sistema elétrico	Motor	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Motor	Energia	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Sistema elétrico	Projeto	prover funcionamento de seus componentes	pane	curto circuito em componente	não funcionamento do sistema	4	1
Sistema elétrico	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Carroceria	Energia	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Bomba de porão	Energia	tensão	nenhum	pane no sistema elétrico	não funcionamento da bomba	2	1
Válvulas de comando	Caixa de transferência	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de transferência	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de bloqueio	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Caixa de bloqueio	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Válvulas de comando	Projeto	proporcionar comando no acionamento de atuadores				3	0,6
Válvulas de comando	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Válvulas de comando	Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	vazamento	perda de capacidade de acionamento	2	0,4
Válvulas de comando	Ar comprimido	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/mau posicionamento da válvula	perda de capacidade de acionamento	3	0,4

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Válvulas de comando	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Prancha quebra-ondas	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Prancha quebra-ondas	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Porta traseira	Massa	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Porta traseira	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Cobertura do motor	Física	não considerado				0	0
Válvulas de comando	Cobertura do motor	Massa	não considerado				0	0
Controle do freio	Freio dianteiro	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freio dianteiro	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio	Freio dianteiro	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freios traseiros	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Freios traseiros	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio	Freios traseiros	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução no desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio	Controle do freio	Projeto	controlar frenagem	perda de fluido	falha em vedação/vazamento	redução no desempenho/acionamento difícil	2	1
Controle do freio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,2
Controle do freio	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	3	0,2
Controle do freio	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ar comprimido	Motor	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	restrição/obstrução	maior esforço do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Motor	Energia	resistência pneumática	maior	obstrução/uso indevido	quebra do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Ar comprimido	Caixa de transferência	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão do sistema	mau acionamento/mau engrenamento	2	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	baixa pressão/vazamento	mau acionamento/mau engrenamento	3	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Física	folga	maior	movimento/vibração	baixa pressão/vazamento	2	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	sobrepresão insuficiente durante a navegação	3	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Física	folga	maior	movimento/vibração	sobrepresão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema	sobrepresão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/não acionamento/acionamento pela metade	2	0,6
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Energia	pressão pneumática	menor	pressão baixa no sistema	não acionamento/acionamento pela metade	2	0,6
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	pressão baixa no sistema	movimento lento	3	0,6
Ar comprimido	Válvulas de comando	Física	folga	maior	desgaste da vedação	funcionamento irregular	2	0,6
Ar comprimido	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0
Ar comprimido	Válvulas de comando	Massa	não considerado				0	0
Ar comprimido	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Ar comprimido	Controle do freio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obsrtução/baixa pressão	redução no desempenho	4	0,6
Ar comprimido	Ar comprimido	Projeto	transmissão de energia por meio de ar comprimido	vazamento	danos físicos de componentes/folgas	redução no desempenho	3	0,8
Ar comprimido	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ar comprimido	Prancha quebradas	Física	folga	errado	movimento/vibração	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,4
Ar comprimido	Prancha quebra-ondas	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	mau acionamento/acionamento parcial	3	0,4
Ar comprimido	Porta traseira	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	dificuldade no fechamento	2	0,6
Ar comprimido	Porta traseira	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	dificuldade no fechamento	3	0,6
Ar comprimido	Porta traseira	Física	folga	maior	movimento/vibração	dificuldade no fechamento	2	0,4
Ar comprimido	CTIS	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,8
Ar comprimido	CTIS	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	baixa pressão	menor velocidade para enchimento	3	0,8
Ar comprimido	CTIS	Energia	pressão pneumática	menor	deficiência no sistema	redução no desempenho	2	0,8
Carroceria	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Controle do freio	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Ar comprimido	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Bomba de porão	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Porta traseira	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	não fechamento da porta	2	1
Carroceria	CTIS	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Para-brisas	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Bomba de porão	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Bomba de porão	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Bomba de porão	Projeto	drenar água em navegação	não funciona	travamento	não funcionamento da bomba	2	1
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	4	0,4
Porta traseira	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Porta traseira	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Porta traseira	Carroceria	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	falha na vedação	2	1
Porta traseira	Porta traseira	Projeto	prover vedação	falha na vedação	desgaste de componentes	entrada de água quando na navegação	2	1
CTIS	Rodas dianteiras	Energia	pressão de enchimento	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	esvaziamento/pneu murcho	2	0,4
CTIS	Rodas dianteiras	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	menor velocidade para enchimento	3	0,2
CTIS	Rodas dianteiras	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
CTIS	Rodas intermediárias/traseiros	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	menor velocidade para enchimento	3	0,2
CTIS	Rodas intermediárias/traseiros	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
CTIS	Rodas intermediárias/traseiros	Energia	pressão de enchimento	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	esvaziamento/pneu murcho	2	0,4
CTIS	Ar comprimido	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/mau posicionamento da válvula	perda de capacidade de acionamento	2	0,4
CTIS	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
CTIS	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
CTIS	Carroceria	Física	não considerado				0	0
CTIS	CTIS	Projeto	encher pneu	pressão baixa	vazamento em componentes internos	redução no desempenho	3	1
Para-brisas	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Para-brisas	Para-brisas	Projeto	prover barreira contra o vento	quebra do vidro	impactos/operação indevida	perda de conforto	3	1

Fonte: autor

Tabela G.4 - Análises de interações da configuração A3 (apenas interações revistas).

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Motor	Motor	Projeto	transformar energia química em mecânica	não funciona	desgaste de componente internos	veículo não anda	3	1
Motor	Suporte do motor	Energia	vibração mecânica	maior	falha nos coxins	quebra do suporte/motor	3	1
Motor	Suporte do motor	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento do motor	empenamento	3	0,6
Motor	Admissão de ar	Energia	calor	maior	radiação/convecção	dano aos componentes da admissão	2	0,2
Motor	Admissão de combustível	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamentos	2	0,6
Motor	Admissão de combustível	Massa	contaminação	maior	sujeira em excesso	acúmulo de impurezas	1	0,2
Motor	Admissão de combustível	Energia	calor	maior	radiação/convecção	dano aos componentes da admissão	2	0,2
Motor	Escapamento	Energia	calor	maior	falha no isolamento térmico	dano aos componentes do sistema receptor	1	0,8
Motor	Escapamento	Física	folga	maior	vibração/dilatação/deslocamentos	escape de fumaça e ruído	2	0,4
Motor	Escapamento	Massa	fluxo de gases de escapamento	maior	problemas na mistura/queima	aumento do volume de gases/aquecimento	4	0,2
Motor	Arrefecimento	Massa	fluxo de água	menor	restrição	redução da capacidade de arrefecimento	4	0,6
Motor	Arrefecimento	Física	folga	maior	vazamento	perda de água/redução do arrefecimento	2	0,4
Motor	Arrefecimento	Energia	calor	maior	aquecimento excessivo do motor: problema de lubrificação/funcionamento	redução da capacidade de arrefecimento	5	0,6

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
					forçado			
Motor	Caixa de transmissão	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	dano a componentes	3	0,2
Motor	Caixa de transmissão	Energia	torque	maior	operação anormal do motor	quebra de componentes	5	0,8
Motor	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Motor	Sistema elétrico	Energia	eletricidade	nenhuma	falha no alternador	baixa autonomia do sistema elétrico	5	0,8
Motor	Direção	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,4
Motor	Direção	Massa	fluxo de óleo	menor	falha na bomba/correia	direção dura	3	0,6
Motor	Direção	Energia	pressão hidráulica	menor	falha na bomba/correia	direção dura	5	0,6
Motor	Ar comprimido	Massa	contaminação/umidade	maior	problema na filtragem/compressão	perda de qualidade do AC	2	0,4
Motor	Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	deficiência na compressão	perda de capacidade do sistema de AC	3	0,8
Motor	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,6
Motor	Ar condicionado	Energia	transmissão de potência	menor	perda de potência no motor	redução de desempenho do componente	1	1
Motor	Ar condicionado	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	danos físicos ao componente	1	0,4
Suporte do motor	Motor	Energia	não considerado				0	0
Suporte do motor	Motor	Física	não considerado				0	0
Suporte do motor	Suporte do motor	Projeto	suportar o motor	quebra	vibração/fadiga	mau posicionamento do motor	1	1
Suporte do motor	Carroceria	Energia	esforços estruturais	maior	operação anormal do motor	quebra/trinca	2	0,6
Suporte do motor	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Admissão de ar	Motor	Energia	temperatura	maior	condições ambientais	queda de rendimento	2	0,2
Admissão de ar	Motor	Física	folga	maior	vibração/movimentos do	entrada de	2	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
					veículo	contaminantes		
Admissão de ar	Motor	Massa	fluxo de ar	menor	obstrução do sistema	maior esforço do motor/queda de potência	5	0,4
Admissão de ar	Admissão de ar	Projeto	fornecer comburente para o motor	obstrução	sujeira em excesso	queda de rendimento	4	1
Admissão de ar	Escapamento	Física	folga	maior	vibração/ajuste da turbina	escape de fumaça e ruído	2	0,2
Admissão de ar	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Admissão de combustível	Motor	Energia	diferencial de pressão na do aspiração do combustível	menor	vazamento/entrada de ar	redução no desempenho/parada do motor	2	0,8
Admissão de combustível	Motor	Massa	fluxo de combustível	menor	obstrução do sistema	queda de rendimento	5	0,6
Admissão de combustível	Motor	Física	folga	maior	vibração/movimentos do veículo	vazamentos/perda de potência/entrada de ar	2	0,4
Admissão de combustível	Admissão de combustível	Projeto	fornecer combustível	vazamento	trinca/quebra de componentes	queda de rendimento/entrada de ar na linha de admissão	4	1
Admissão de combustível	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Admissão de combustível	Carroceria	Energia	não considerado				0	0
Escapamento	Motor	Física	não considerado				0	0
Escapamento	Motor	Energia	resistência pneumática	maior	obstrução do sistema	queda de rendimento	5	0,2
Escapamento	Admissão de ar	Energia	calor	maior	falha em isolamento térmico	dano aos componentes da admissão	2	0,2
Escapamento	Escapamento	Projeto	eliminar gases da combustão	furo/vazamento de gases	corrosão	escape de fumaça e ruído	3	1

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
			motor de forma adequada					
Escapamento	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ventilador	Ventilador	Projeto	prover ventilação forçada	quebra	desbalanceamento de pá do hélice	inoperante	2	1
Ventilador	Arrefecimento	Massa	fluxo forçado de ar	menor	geometria dos hélices/rotação baixa	redução da capacidade de arrefecimento	6	0,8
Ventilador	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Ventilador	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Ventilador	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Arrefecimento	Motor	Energia	arrefecimento	menor	perda de fluido/redução de capacidade de arrefecimento	aumento da temperatura do motor/parada	4	0,8
Arrefecimento	Motor	Massa	fluxo de água fria	menor	obstrução/entupimento	aumento da temperatura do motor/parada	4	0,8
Arrefecimento	Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,4
Arrefecimento	Arrefecimento	Projeto	arrefecer componentes	não arrefecimento	quantidade insuficiente de líquido refrigerante	redução da capacidade de arrefecimento	3	0,8
Arrefecimento	Caixa de transmissão	Energia	arrefecimento	menor	pouco fluido	dano a componentes	4	0,8
Arrefecimento	Caixa de transmissão	Massa	fluido de óleo para refrigeração	menor	restrição	dano a componentes	4	0,8
Arrefecimento	Caixa de transmissão	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Arrefecimento	Caixa de transferência	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Arrefecimento	Caixa de transferência	Energia	arrefecimento	menor	baixo nível de óleo	aquecimento/perda de componentes	2	0,4
Arrefecimento	Carroceria	Física	não considerado				0	0

Linha		Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Caixa transmissão	de	Motor	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	dano a componentes	3	0,2
Caixa transmissão	de	Motor	Energia	resistência ao movimento	maior	operação anormal do motor	quebra de componentes	4	0,4
Caixa transmissão	de	Arrefecimento	Massa	fluxo de óleo	menor	restrição	redução da capacidade de arrefecimento	4	0,4
Caixa transmissão	de	Arrefecimento	Física	folga	maior	vazamento	perda de óleo/redução do arrefecimento	2	0,2
Caixa transmissão	de	Arrefecimento	Energia	calor	maior	aquecimento excessivo do componente: problema de lubrificação/funcionamento forçado	redução da capacidade de arrefecimento	3	0,4
Caixa transmissão	de	Caixa transmissão	Projeto	prover redução mecânica selecionada pelo motorista	não engrenamento	desgaste/defeito em componentes internos	não é possível selecionar marcha	3	0,8
Caixa transmissão	de	Caixa transferência	Energia	torque	maior	operação forçada	quebra do cardã	2	1
Caixa transmissão	de	Caixa transferência	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	1
Caixa transmissão	de	Freio de estacionamento	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste de componentes	não acionamento/acionamento parcial	3	0,8
Caixa transmissão	de	Freio de estacionamento	Energia	calor	maior	atrito	sobreaquecimento/fragilização	4	0,2
Caixa transferência	de	Arrefecimento	Energia	calor	maior	aquecimento excessivo do componente: problema de lubrificação/funcionamento forçado	redução da capacidade de arrefecimento	2	0,4
Caixa transferência	de	Arrefecimento	Massa	fluxo de óleo	menor	restrição	redução da capacidade de arrefecimento	4	0,4
Caixa transferência	de	Arrefecimento	Física	folga	maior	vazamento	perda de óleo/redução do arrefecimento	2	0,2

Linha		Coluna		tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Caixa transferência	de	Caixa transmissão	de	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrito/operação	quebra do cardã	2	0,8
Caixa transferência	de	Caixa transmissão	de	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	0,8
Caixa transferência	de	Caixa transferência	de	Projeto	prover redução mecânica	não funcionamento	quebra de componente interno	veículo não anda	2	1
Caixa transferência	de	Diferencial dianteiro		Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	0,8
Caixa transferência	de	Diferencial dianteiro		Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cardã	3	0,8
Caixa transferência	de	Diferencial traseiro		Energia	torque	maior	travamento das rodas/operação indevida	quebra do cardã	3	0,8
Caixa transferência	de	Diferencial traseiro		Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	3	0,8
Caixa transferência	de	Ar comprimido		Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Caixa transferência	de	Ar comprimido		Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa transferência	de	Carroceria		Energia	esforços estruturais	maior	operação anormal do motor	quebra/trinca	2	0,6
Caixa transferência	de	Carroceria		Física	não considerado				0	0
Caixa transferência	de	Caixa navegação	de	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	1
Caixa transferência	de	Caixa navegação	de	Energia	torque	menor	engrenamento insuficiente	não funcionamento do componente	3	0,8
Diferencial dianteiro		Caixa transferência	de	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrito/operação	quebra do cardã	2	0,6
Diferencial dianteiro		Caixa transferência	de	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	4	0,6
Cubos de rodas dianteiras		Freio dianteiro		Energia	atrito	menor	presença de água	redução no desempenho	2	1

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
						frenagem		
Cubos de rodas dianteiras	Freio dianteiro	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste	redução de desempenho no de frenagem	2	1
Rodas dianteiras	CTIS	Energia	pressão	maior	obstrução/entupimento	redução de desempenho no	2	0,6
Rodas dianteiras	CTIS	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho no	2	0,6
Rodas dianteiras	CTIS	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,8
Freio dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Física	afastamento	maior	desgaste das pastilhas	dificuldade de frenagem	2	0,6
Freio dianteiro	Cubos de rodas dianteiras	Energia	calor	maior	frenagem continuada	quebra do cubo	4	1
Freio dianteiro	Freio dianteiro	Projeto	freiar o veículo	não funcionamento	desgaste de componentes	veículo não freia	4	1
Freio dianteiro	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho de	2	0,6
Freio dianteiro	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2
Freio dianteiro	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Diferencial traseiro	Caixa de transferência	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	0,8
Diferencial traseiro	Caixa de transferência	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrito/operação	quebra do cardã	2	0,8
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Eixo traseiro (boomerang)	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução de desempenho no	2	0,2
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Caixa de bloqueio	Ar comprimido	Energia	resistência ao	maior	atrito/restrição	redução no	2	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
			movimento			desempenho		
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Freios traseiros	Energia	atrito	menor	presença de água	redução de desempenho frenagem	2	1
Cubos de rodas intermediários/traseiros	Freios traseiros	Física	afastamento quando acionado	maior	desgaste	redução de desempenho frenagem	2	1
Rodas intermediárias/traseiros	CTIS	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Rodas intermediárias/traseiros	CTIS	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,8
Rodas intermediárias/traseiros	CTIS	Energia	pressão	maior	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Freios traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Energia	calor	maior	frenagem continuada	quebra do cubo	4	1
Freios traseiros	Cubos de rodas intermediários/traseiros	Física	afastamento	maior	desgaste das pastilhas	dificuldade de frenagem	2	0,6
Freios traseiros	Freios traseiros	Projeto	freiar o veículo	não funcionamento	desgaste de componentes	veículo não freia	4	1
Freios traseiros	Controle do freio	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução/entupimento	redução de desempenho	2	0,6
Freios traseiros	Controle do freio	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/entupimento	maior força para acionamento	2	0,2
Freios traseiros	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Sistema elétrico	Motor	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Motor	Energia	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Ventilador	Física	não considerado				0	0

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Sistema elétrico	Ventilador	Energia	eletricidade	menor/nenhu m	pane no sistema elétrico	inoperante	2	1
Sistema elétrico	Sistema elétrico	Projeto	prover funcionamento de seus componentes	pane	curto circuito em componente	não funcionamento do sistema	4	1
Sistema elétrico	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Carroceria	Energia	não considerado				0	0
Sistema elétrico	Bomba de porão	Energia	tensão	nenhum	pane no sistema elétrico	não funcionamento da bomba	2	1
Válvulas comando	de Caixa de transferência	Física	não considerado				0	0
Válvulas comando	de Caixa de transferência	Massa	não considerado				0	0
Válvulas comando	de Caixa de bloqueio	Física	não considerado				0	0
Válvulas comando	de Caixa de bloqueio	Massa	não considerado				0	0
Válvulas comando	de Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Válvulas comando	de Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Válvulas comando	de Válvulas de comando	Projeto	proporcionar comando no acionamento de atuadores				3	0,6
Válvulas comando	de Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Válvulas comando	de Ar comprimido	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/mau posicionamento da válvula	perda de capacidade de acionamento	3	0,4
Válvulas comando	de Ar comprimido	Energia	pressão pneumática	menor	vazamento	perda de capacidade de acionamento	2	0,4
Válvulas comando	de Carroceria	Física	não considerado				0	0

Linha		Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Válvulas comando	de	Prancha quebra-ondas	Massa	não considerado				0	0
Válvulas comando	de	Prancha quebra-ondas	Física	não considerado				0	0
Válvulas comando	de	Porta traseira	Física	não considerado				0	0
Válvulas comando	de	Porta traseira	Massa	não considerado				0	0
Válvulas comando	de	Cobertura do motor	Massa	não considerado				0	0
Válvulas comando	de	Cobertura do motor	Física	não considerado				0	0
Direção		Motor	Energia	resistência hidráulica	maior	obstrução/uso indevido	quebra da bomba	2	0,4
Direção		Motor	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	restrição/obstrução	maior esforço da bomba	2	0,4
Direção		Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Controle do freio		Freio dianteiro	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução de desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio		Freio dianteiro	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução de desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio		Freio dianteiro	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio		Freios traseiros	Energia	pressão hidráulica	menor	pouco fluido/vazamentos	redução de desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio		Freios traseiros	Massa	fluxo de fluido hidráulico	menor	obstrução	redução de desempenho da frenagem	3	0,8
Controle do freio		Freios traseiros	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/entrada de ar	2	0,6
Controle do freio		Controle do freio	Projeto	controlar	perda de fluido	falha em	redução no	2	1

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
			frenagem		vedação/vazamento	desempenho/acionamento difícil		
Controle do freio	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	3	0,2
Controle do freio	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,2
Controle do freio	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Freio de estacionamento	Caixa de transmissão	Energia	resistência ao movimento	maior	acionamento parcial ou indevido	maior esforço	3	0,2
Freio de estacionamento	Caixa de transmissão	Física	afastamento quando desacionado	menor	posição indevida da alavanca	maior esforço	3	0,2
Ar comprimido	Motor	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento	2	0,2
Ar comprimido	Motor	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	restrição/obstrução	maior esforço do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Motor	Energia	resistência pneumática	maior	obstrução/uso indevido	quebra do compressor	2	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Física	folga	maior	movimento/vibração	baixa pressão/vazamento	2	0,2
Ar comprimido	Caixa de transferência	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão do sistema	mau acionamento/mau engrenamento	2	0,4
Ar comprimido	Caixa de transferência	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	baixa pressão/vazamento	mau acionamento/mau engrenamento	3	0,4
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema	sobrepessão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	sobrepessão insuficiente durante a navegação	3	0,2
Ar comprimido	Eixo traseiro (boomerang)	Física	folga	maior	movimento/vibração	sobrepessão insuficiente durante a navegação	2	0,2
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/não acionamento/acionam	2	0,6

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
						ento pela metade		
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	pressão baixa no sistema	movimento lento	3	0,6
Ar comprimido	Caixa de bloqueio	Energia	pressão pneumática	menor	pressão baixa no sistema	não acionamento/acionamento pela metade	2	0,6
Ar comprimido	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0
Ar comprimido	Válvulas de comando	Física	folga	maior	desgaste da vedação	funcionamento irregular	2	0,6
Ar comprimido	Válvulas de comando	Massa	não considerado				0	0
Ar comprimido	Controle do freio	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/baixa pressão	redução no desempenho	4	0,6
Ar comprimido	Controle do freio	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Ar comprimido	Ar comprimido	Projeto	transmissão de energia por meio de ar comprimido	vazamento	danos físicos de componentes/folgas	redução no desempenho	3	0,8
Ar comprimido	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ar comprimido	Prancha quebrandas	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,4
Ar comprimido	Prancha quebrandas	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	mau acionamento/acionamento parcial	3	0,4
Ar comprimido	Prancha quebrandas	Física	folga	errado	movimento/vibração	mau acionamento/acionamento parcial	2	0,2
Ar comprimido	Porta traseira	Física	folga	maior	movimento/vibração	dificuldade de fechamento	no 2	0,4
Ar comprimido	Porta traseira	Energia	pressão pneumática	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	dificuldade de fechamento	no 2	0,6

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
Ar comprimido	Porta traseira	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	dificuldade no fechamento	3	0,6
Ar comprimido	CTIS	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,8
Ar comprimido	CTIS	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	baixa pressão	menor velocidade para enchimento	3	0,8
Ar comprimido	CTIS	Energia	pressão pneumática	menor	deficiência no sistema	redução no desempenho	2	0,8
Carroceria	Suporte do motor	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Suporte do motor	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Admissão de ar	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Admissão de combustível	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Escapamento	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Ventilador	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Arrefecimento	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Caixa de transferência	Energia	vibração	maior	movimento do veículo	deslocamento/desalinhamento de componentes	1	0,2
Carroceria	Caixa de transferência	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Válvulas de comando	Energia	não considerado				0	0
Carroceria	Controle do freio	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Ar comprimido	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Bomba de porão	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Porta traseira	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/fo	não fechamento da	2	1

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
					lga nas dobradiças	porta		
Carroceria	CTIS	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Para-brisas	Física	não considerado				0	0
Carroceria	Ar condicionado	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Sistema elétrico	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Sistema elétrico	Energia	não considerado				0	0
Bomba de porão	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Bomba de porão	Bomba de porão	Projeto	drenar água em navegação	não funciona	travamento	não funcionamento da bomba	2	1
Caixa de navegação	Caixa de transferência	Física	alinhamento/montagem	errado	movimento/vibração	quebra do cardã	2	0,6
Caixa de navegação	Caixa de transferência	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento de componentes/atrito/operação	quebra do cardã	2	0,6
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	4	0,4
Prancha quebra-ondas	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Porta traseira	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
Porta traseira	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,2
Porta traseira	Carroceria	Física	posicionamento	errado	empenamento/obstrução/folga nas dobradiças	falha na vedação	2	1
Porta traseira	Porta traseira	Projeto	prover vedação	falha na vedação	desgaste de componentes	entrada de água quando na navegação	2	1
CTIS	Rodas dianteiras	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
CTIS	Rodas dianteiras	Energia	pressão de enchimento	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	esvaziamento/pneu murcho	2	0,4
CTIS	Rodas dianteiras	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	menor velocidade para enchimento	3	0,2

Linha	Coluna	tipo	Função/ parâmetro	Modo/ Palavra-guia	Causa	Consequência	O	I
CTIS	Rodas intermediárias/traseiros	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/entupimento	menor velocidade para enchimento	3	0,2
CTIS	Rodas intermediárias/traseiros	Energia	pressão de enchimento	menor	baixa pressão no sistema/vazamento	esvaziamento/pneu murcho	2	0,4
CTIS	Rodas intermediárias/traseiros	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
CTIS	Ar comprimido	Massa	fluxo de ar comprimido	menor	obstrução/mau posicionamento da válvula	perda de capacidade de acionamento	2	0,4
CTIS	Ar comprimido	Energia	resistência ao movimento	maior	atrito/restrição	redução no desempenho	2	0,4
CTIS	Ar comprimido	Física	folga	maior	movimento/vibração	vazamento/redução de capacidade	2	0,4
CTIS	Carroceria	Física	não considerado				0	0
CTIS	CTIS	Projeto	encher pneu	pressão baixa	vazamento em componentes internos	redução no desempenho	3	1
Para-brisas	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Para-brisas	Para-brisas	Projeto	prover barreira contra o vento				3	1
Ar condicionado	Motor	Física	não considerado				0	0
Ar condicionado	Motor	Energia	resistência ao movimento	maior	travamento/restrição interna	redução no desempenho	2	0,4
Ar condicionado	Carroceria	Física	não considerado				0	0
Ar condicionado	Ar condicionado	Projeto	refrigerar o habitáculo	não refrigera	calor excessivo/sujeira	desconforto	3	1