

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E
DE MATERIAIS - PPGEM**

MARCOS SULEVIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE
CLASSIFICATÓRIA DE CONCEPÇÕES DE PRODUTO
CONSIDERANDO DIRETRIZES DE MANTENABILIDADE NA ETAPA
DO PROJETO CONCEITUAL**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2015**

MARCOS SULEVIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE
CLASSIFICATÓRIA DE CONCEPÇÕES DE PRODUTO
CONSIDERANDO DIRETRIZES DE MANTENABILIDADE NA ETAPA
DO PROJETO CONCEITUAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. Carlos Cziulik, Ph.D.

**CURITIBA
2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S949d Sulevis, Marcos
2015 Desenvolvimento de um método de análise classificatória de concepções de produto considerando diretrizes de manutenibilidade na etapa do projeto conceitual / Marcos Sulevis.-- 2015.
147 f. : il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2015
Bibliografia: p. 119-123

1. Manutenibilidade (Engenharia). 2. Produtos novos. 3. Sistema CAD/CAM. 4. Indústria automobilística - Inovações tecnológicas. 5. Engenharia mecânica - Dissertações. I. Cziulik, Carlos, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCOS SULEVIS

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE CLASSIFICATÓRIA DE CONCEPÇÕES DE PRODUTO CONSIDERANDO DIRETRIZES DE MANTENABILIDADE NA ETAPA DO PROJETO CONCEITUAL

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Prof. Osiris Canciglieri Junior, Ph.D.
(PUC PR)

Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.
(UTFPR)

Prof. Walter Luís Mikos, Dr.
(UTFPR)

Prof. Carlos Cziulik, Ph.D.
(UTFPR)

Curitiba, 31 de agosto de 2015.

AGRADECIMENTO

A

Deus primeiramente, grande Pai, presente em todos os momentos da minha vida.

Carlos Cziulik, pela confiança e dedicação ao longo da dissertação.

Vanessa, minha esposa, por estar sempre presente e, com sua verdadeira prova de amor ter me motivado a continuar até nas horas mais difíceis, presenteando-me com a notícia da chegada do nosso filho (a).

Ao meu pai (in memoriam) e minha mãe, por terem me dado valores e educação e, por muitas vezes terem renunciado aos seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu.

Amigos e colegas da vida profissional, por fazerem parte da construção do conhecimento aqui registrado.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”
(Henry Ford).

SULEVIS, Marcos, **Desenvolvimento de um método de análise classificatória de concepções de produto considerando diretrizes de manutenibilidade na etapa do projeto conceitual**, 2015, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 147p.

RESUMO

Atualmente, na indústria automotiva voltada à produção de veículos pesados, se objetiva oferecer produtos de grande valor agregado, cujos clientes buscam um veículo com uma grande disponibilidade de operação e com a capacidade de realizar uma manutenção de forma planejada, rápida e correta. Como a manutenção é uma ação executada em um produto acabado, para que ela seja conduzida com alta qualidade, requisitos devem ser endereçados na etapa de PDP. Baseado na necessidade de explorar novos diferenciais no mercado, desde a venda do produto em si até o suporte de pós-vendas, a presente dissertação tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de uma sistemática para acoplar ferramentas CAD, ferramentas de análise de rotas de desmontagem de conjuntos mecânicos e regras chaves de manutenção, para produzir uma análise classificatória que subsidie o engenheiro de serviço, juntamente com os demais membros do time de projeto na avaliação e seleção, durante o PDP, de conceitos que melhor suportem diretrizes de manutenibilidade. A partir de um levantamento bibliográfico, foram exploradas informações disponíveis atualmente no PDP, estudo de rotas para remoção de componentes, requisitos propostos sobre manutenibilidade e, a utilização de uma ferramenta de tomada de decisão utilizando-se multicritérios. Deste modo, determinou-se a estrutura do método, e o processo adotado para o desenvolvimento da análise classificatória de concepções de produto, considerando diretrizes de manutenibilidade adotadas na etapa do projeto conceitual. A partir das informações levantadas na pesquisa bibliográfica e da coleta de dados de campo referentes à manutenção ao longo dos anos, definiram-se as premissas que o método deveria atender. Em uma próxima etapa, o método foi submetido a avaliação, através da aplicação do mesmo em um experimento realizado em ambiente controlado. Neste caso, três alternativas pré-definidas foram escolhidas e submetidas ao mesmo. Assim, foi possível verificar o comportamento do método quando aplicado. Os resultados preliminares indicam que a abordagem utilizada pelo método é satisfatória para avaliar alternativas conceituais com base em critérios de manutenibilidade. Trabalhar a manutenibilidade de modo sistemático nas etapas iniciais de projeto potencializa as chances de sucesso do produto. Assim, o uso desta ferramenta poderá contribuir na maximização dos lucros de pós-vendas, aumento da disponibilidade do produto e redução do custo de manutenção, devido à geração de produtos diferenciados e com valor agregado.

Palavras-chave: Manutenibilidade; PDP; Estudo de Rotas para Manutenção; AHP.

SULEVIS, Marcos, **Desenvolvimento de um método de análise classificatória de concepções de produto considerando diretrizes de manutenibilidade na etapa do projeto conceitual**, 2015, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 147p.

ABSTRACT

Currently, the automotive industry focused on heavy vehicles production, aim at offering high added value products for customers seeking a vehicle with a high operational availability and the ability to carry out maintenance in a planned, quick and correct approach. As maintenance is an action performed in a finished product, for it to be conducted with high quality, requirements must be addressed in the PDP stage. Based on the need to explore new advantages in the market, from the sales of the product itself to the aftermarket support, this thesis aims at presenting the development of a systematic that engage CAD tools, analysis tool for disassemble routes of mechanical assemblies and maintenance key rules, to produce a classification analysis that assists the service engineer along with the project team in the evaluation and selection, during the PDP, of concepts that best support maintainability guidelines. From a literature review, were explored information available on the PDP, studies related to components removal routes, maintainability requirements and multi criteria decision making tool usage. In this way, it was structured the method and process for the development of classification analysis of product proposals considering maintainability guidelines during the conceptual design stage. From the information collected from literature and field regarding the maintenance over the years, the assumptions that the method should meet were established. In the next step, the method was submitted to evaluation, by its application in an experiment conducted in a controlled environment. In this case, three pre-defined alternatives were selected and submitted to the method. Preliminary results indicate that the approach is satisfactory to assess conceptual alternatives based on maintainability criteria. Working maintainability systematically in the early stages of design enhances the product's chances of success. Thus, this tool can contribute in the aftermarket profits maximization, product availability increasing and maintenance cost reduction, due to the definition of differentiated products with added values.

Keywords: Maintainability; PDP; Maintenance routes study; AHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Manutenção de um veículo comercial.....	22
Figura 2 - Custo total de um produto ao longo do seu ciclo de vida.....	24
Figura 3 - A importância de requisitos de manutenibilidade no processo de PDP.....	25
Figura 4 – Estrutura do estudo	28
Figura 5 - Estratificação dos custos de um produto durante seu ciclo de vida	31
Figura 6 - Fases de concepção de um produto conforme sugerem Pahl e coautores	33
Figura 7 – Exemplo de diretrizes de manutenibilidade.....	34
Figura 8 - Ergonomia e espaço para posição de trabalho (cm).....	40
Figura 9 - Ergonomia e espaço para posição de trabalho (acesso horizontal) com a utilização de ferramenta universal (cm).....	41
Figura 10 - Ergonomia e espaço para posição de trabalho (acesso vertical) com a utilização de ferramenta universal (cm).....	41
Figura 11 - Compressor de um veículo comercial com rota solidificada (<i>swept volume</i>).....	43
Figura 12 - Troca de um disco de embreagem em um veículo comercial	43
Figura 13 - Solidificação da rota de saída de uma caixa de transmissão.....	43
Figura 14 – Verificação da montagem de um console e seu respectivo suporte de fixação no túnel de um veículo	46
Figura 15 – IPS - Árvore de geometrias após a operação de importação.....	47
Figura 16 – IPS - Árvore de geometrias (após organização) para uma tampa de porta malas de um veículo de passeio	47
Figura 17 – IPS - Componente (porta objetos) que terá sua rota de desmontagem planejada.....	48
Figura 18 – IPS – Posição final (porta objetos) após sua desmontagem	48
Figura 19 – IPS – Rota de desmontagem (porta objetos)	49

Figura 20 – IPS – Volume de varredura descrito pela geometria (porta objetos) durante sua remoção	49
Figura 21 – Exemplo de hierarquia de critérios / objetivos	51
Figura 22 – Exemplo de matriz comparativa	54
Figura 23 – Hierarquia de critérios da organização fictícia ACME	56
Figura 24 – Hierarquia de critérios de nível superior para priorização do portfólio de projetos ACME	56
Figura 25 – Matriz de critérios superiores ACME estabelecida	57
Figura 26 – Matriz de critérios superiores ACME preenchida	57
Figura 27 – Tabela de índices randômicos (IR).....	58
Figura 28 – Normalização da matriz de critérios superiores ACME	59
Figura 29 – Cálculo do auto-vetor para a matriz de critérios superiores ACME	59
Figura 30 – Cálculo do auto-valor máximo para a matriz de critérios superiores ACME	60
Figura 31 – Contribuição de cada critério do nível superior ACME	61
Figura 32 – Hierarquia de critérios da organização fictícia ACME com ênfase nos níveis inferiores	61
Figura 33 – Matriz de critérios inferiores ACME	62
Figura 34 – Prioridade para os critérios inferiores ACME	62
Figura 35 – Hierarquia de critérios da organização fictícia ACME com as prioridades globais.....	63
Figura 36 – Resultado final para as prioridades do portfólio de projetos da organização fictícia ACME	65
Figura 37 – Ocasão de uso do método	69
Figura 38 – Esquema representativo do método para análise classificatória baseada em vetores de manutenibilidade	70
Figura 39 – Exemplo de tanques de ar utilizados em veículos de aplicação pesada	71
Figura 40 – Alternativas importadas no <i>software</i> IPS.....	73

Figura 41 – Organização da árvore dentro do <i>software</i> IPS para as três alternativas analisadas	74
Figura 42 – Componentes a serem desmontados dentro do <i>software</i> IPS para as três alternativas analisadas	74
Figura 43 – Posição final das três alternativas após a desmontagem.....	75
Figura 44 – Rota de desmontagem proposta pelo <i>software</i> para as três alternativas	75
Figura 45 – Volume de varredura descrito pelo tanque de ar	76
Figura 46 – Cinco grupos de critérios das RBMs	78
Figura 47 – Exemplo da análise e compactação das regras para obtenção das RBMs	78
Figura 48 – Critérios de regras que compõe as RBMs e seus respectivos grupos ...	79
Figura 49 - Critérios que compõe as RBMs aplicáveis na análise de manutenibilidade de sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados.....	82
Figura 50 - Matriz comparativa para os cinco grupos de critérios das RBMs.....	83
Figura 51 - Matriz comparativa com os julgamentos para os cinco grupos de critérios das RBMs (Detalhamento do Método)	83
Figura 52 - Matriz comparativa normalizada para os cinco grupos de critérios das RBMs	84
Figura 53 – Cálculo do auto-vetor para os cinco grupos de RBMs	85
Figura 54 – Cálculo do auto-valor máximo	85
Figura 55 - Resultados da matriz comparativa de critérios para os cinco grupos de RBMs, evidenciando a contribuição de cada critério	86
Figura 56 - Hierarquia de critérios das RBMs com destaque para o segundo nível da hierarquia	87
Figura 57 - Hierarquia de critérios das RBMs com as prioridades globais de cada um dos critérios	89
Figura 58 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.5 das RBMs	92

Figura 59 – Resultado final da priorização das três alternativas em relação às RBMs	92
Figura 60 – Montagem tridimensional de um veículo comercial.....	95
Figura 61 – Ênfase no componente alvo da operação de manutenção (embreagem)	96
Figura 62 – Alternativa 01 para o reforço da longarina	97
Figura 63 – Alternativa 02 para o reforço da longarina	98
Figura 64 – Alternativa 03 para o reforço da longarina	99
Figura 65 – Componentes alvos do estudo de rotas de manutenção	101
Figura 66 – Exemplo de um carrinho (disponível para aquisição no mercado) para remoção de caixa de transmissão e seus respectivos graus de liberdade.....	101
Figura 67 – Ponto final (após desmontagem) para a caixa de transmissão e para a embreagem	102
Figura 68 – Volume de varredura originado pela caixa de transmissão (Alternativa 01).....	103
Figura 69 – Volume de varredura originado pela caixa de transmissão (Alternativa 02).....	104
Figura 70 – Colisão encontrada entre o sistema de exaustão (escapamento) e a caixa de transmissão (Alternativa 03)	105
Figura 71 – Remoção do sistema de exaustão (escapamento)	105
Figura 72 – Volume de varredura originado pela caixa de transmissão (Alternativa 03).....	106
Figura 73 – Volume de varredura originado pela embreagem (Alternativas 01, 02 e 03).....	107
Figura 74 – RBMs aplicáveis na análise de manutenibilidade de troca de sistemas de embreagem	108
Figura 75 – Prioridades locais e globais para RBMs aplicadas na análise de manutenibilidade da troca de sistemas de embreagem	111

Figura 76 – Percentuais de priorização das três alternativas analisadas na manutenibilidade de sistemas de embreagem.....	112
Figura 77 – Região que possui o acesso comprometido aos elementos de fixação para a Alternativa 01	114
Figura 78 – Matriz comparativa para o grupo acessibilidade utilizada na descrição do método	125
Figura 79 – Matriz comparativa para o grupo calibração, abastecimento e lubrificação utilizada na descrição do método	126
Figura 80 – Matriz comparativa para o grupo diagnóstico utilizada na descrição do método	127
Figura 81 – Matriz comparativa para o grupo montagem e desmontagem utilizada na descrição do método	128
Figura 82 – Matriz comparativa para o grupo ferramentas utilizada na descrição do método	129
Figura 83 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.1 das RBMs	131
Figura 84 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.6 das RBMs	131
Figura 85 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 2.2 das RBMs	132
Figura 86 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 2.4 das RBMs	132
Figura 87 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 2.5 das RBMs	133
Figura 88 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.1 das RBMs	133
Figura 89 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.2 das RBMs	134
Figura 90 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.3 das RBMs	134

Figura 91 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.4 das RBMs	135
Figura 92 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.5 das RBMs	135
Figura 93 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.1 das RBMs	136
Figura 94 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.2 das RBMs	136
Figura 95 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.3 das RBMs	137
Figura 96 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.4 das RBMs	137
Figura 97 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.5 das RBMs	138
Figura 98 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.7 das RBMs	138
Figura 99 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.8 das RBMs	139
Figura 100 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.10 das RBMs	139
Figura 101 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.1 das RBMs	140
Figura 102 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.2 das RBMs	140
Figura 103 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.3 das RBMs	141
Figura 104 – Matriz comparativa para o grupo acessibilidade utilizada na aplicação do método	143
Figura 105 – Matriz comparativa para o grupo montagem e desmontagem utilizada na aplicação do método	143

Figura 106 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.1 das RBMs	145
Figura 107 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.5 das RBMs	145
Figura 108 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.1 das RBMs	146
Figura 109 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.8 das RBMs	146
Figura 110 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.2 das RBMs	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Operações de serviço e seus respectivos códigos.....	36
Tabela 2 – Tempo (s) de desmontagem para parafusos ou porcas usando chaves de fenda manuais.....	37
Tabela 3 – Escala de relativa importância de Saaty.....	53
Tabela 4 – Valores utilizados para definição das prioridades do portfólio de projetos ACME.....	66
Tabela 5 – Valores utilizados para definição das prioridades entre as três alternativas analisadas.....	91
Tabela 6 – Valores utilizados para definição das prioridades entre as três alternativas analisadas na manutenibilidade de sistemas de embreagem.....	112
Tabela 7 – Comparação entre os valores obtidos para as alternativas 01 e 02.....	113
Tabela 8 – Comparação entre os valores obtidos para as alternativas 02 e 03.....	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição e parâmetros das alternativas apresentadas.....	72
Quadro 2 - Critérios de julgamento dos itens de RBMs durante a aplicação do método	108

LISTA DE SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Método de Análise Hierárquica)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto Assistido por Computador)
DFA	<i>Design for Assembly</i> (Projeto para Montagem)
DFS	<i>Design for Service</i> (Projeto Voltado para Serviço)
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planejamento de Recurso Corporativo)
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos)
IC	Índice de Consistência
IR	Índice Randômico
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i> (Tempo Médio Para Reparos)
n	Número de linhas e colunas de uma matriz
PDM	<i>Product Data Management</i> (Gerenciamento de Dados do Produto)
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
RBMs	Regras Básicas de Manutenibilidade
RC	Razão de Consistência
VRML	<i>Virtual Reality Modeling Language</i> (Linguagem para Modelagem de Realidade Virtual)
$\lambda_{\text{Máx}}$	Auto-Valor Máximo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO EM SEU ÂMBITO GERAL.....	20
1.2 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE	23
1.3 OBJETIVOS DO PROJETO.....	26
1.3.1 Objetivo Geral.....	26
1.3.2 Objetivos Específicos.....	26
1.4 JUSTIFICATIVAS	26
1.5 ABORDAGEM METODOLÓGICA	27
1.6 ESTRUTURA DO ESTUDO.....	27
2 MANTENABILIDADE NO CONTEXTO DO PDP.....	30
2.1 MANUTENÇÃO E MANTENABILIDADE DENTRO DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO.....	30
2.2 MANTENABILIDADE NO PDP	33
2.2.1 Guias de referência para manutenibilidade	34
2.2.2 Projeto voltado para serviço - DFS	35
2.2.2.1 Procedimento do DFS.....	36
2.2.2.2 Otimização do DFS.....	39
2.3 ERGONOMIA E SUA IMPORTÂNCIA DENTRO DO PROCESSO DE MANTENABILIDADE	40
2.4 PLANEJAMENTO DE MOVIMENTO ATRAVÉS DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADOS A MANTENABILIDADE.....	42
2.4.1 Planejando rotas de saída - <i>Path Planning</i>	44
2.4.1.1 A ferramenta IPS – <i>Path Planner</i>	45
2.5 UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO MULTICRITÉRIO <i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS - AHP</i> COMO PROPOSTA DE SUPORTE À CLASIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE MANTENABILIDADE.....	50
2.5.1 O processo de hierarquização e aplicação do AHP e a escala de comparação - Escala Saaty	52

2.5.1.1	Definição do problema e o que se procura saber	55
2.5.1.2	Decomposição do problema desestruturado em hierarquias sistemáticas	55
2.5.1.3	Elaboração das matrizes de comparação.....	56
2.5.1.4	Realização do julgamento dos elementos de uma matriz.....	57
2.5.1.5	Cálculo do índice e da razão de consistência.....	58
2.5.1.6	Estabelecimento das prioridades locais e globais	62
2.5.1.7	Classificação dos fatores baseado nas prioridades locais e globais	64
2.6	CARACTERIZAÇÃO DE OPORTUNIDADES.....	66
3	MÉTODO PARA CLASSIFICAÇÃO DE CONCEPÇÕES DE PRODUTO CONSIDERANDO DIRETRIZES DE MANTENABILIDADE	68
3.1	PRESSUPOSTOS DO MÉTODO	68
3.2	DESCRIÇÃO DO MÉTODO.....	70
3.2.1	Etapa 1: Identificação de possíveis conceitos.....	71
3.2.2	Etapa 2: Estudo de rotas de manutenção	73
3.2.3	Etapa 3: Ordenamento das alternativas.....	77
3.2.3.1	Conjunto de Regras Básica de Manutenibilidade – RBMs	77
3.2.3.2	Programação multicritério <i>AHP – Analytic Hierarchy Process</i> para priorização das RBMs	80
3.2.3.3	Definição do problema e o que se procura saber	80
3.2.3.4	Decomposição do problema desestruturado em hierarquias sistemáticas	81
3.2.3.5	Elaboração das matrizes de comparação.....	82
3.2.3.6	Realização do julgamento dos elementos da matriz.....	83
3.2.3.7	Cálculo do índice e da razão de consistência.....	84
3.2.3.8	Estabelecimento das prioridades globais e locais dos critérios do segundo nível da hierarquia das RBMs.....	88
3.2.3.9	Classificação dos itens de cada grupo das RBMs baseado nas prioridades locais e globais.	90
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MÉTODO	93
4	APLICAÇÃO DO MÉTODO	94
4.1	REALIZAÇÃO DA ANÁLISE	94
4.1.1	Caracterização do cenário e das alternativas	95

4.1.2	Aplicação do método nas alternativas propostas	99
4.1.2.1	Etapa 1: Identificação de possíveis conceitos	100
4.1.2.2	Etapa 2: Estudo de rotas de manutenção.....	100
4.1.2.3	Etapa 3: Ordenamento das alternativas.....	107
4.2	RESULTADOS DA ANÁLISE.....	111
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A ANÁLISE	113
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116
5.1	CONCLUSÕES.....	116
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE A - MATRIZES COMPARATIVAS E OS VALORES OBTIDOS PARA O ÍNDICE E RAZÃO DE CONSISTÊNCIA DOS GRUPOS DAS RBMS UTILIZADAS NA DESCRIÇÃO DO MÉTODO	124
	APÊNDICE B - MATRIZ COMPARATIVA (UTILIZADA NA DESCRIÇÃO DO MÉTODO) E RESULTADO DA PRIORIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS (CONCEITOS) EM RELAÇÃO AOS CRITÉRIOS DOS ITENS DAS RBMS	130
	APÊNDICE C - MATRIZES COMPARATIVAS E OS VALORES OBTIDOS PARA O ÍNDICE E RAZÃO DE CONSISTÊNCIA DOS GRUPOS DAS RBMS UTILIZADAS NA APLICAÇÃO DO MÉTODO	142
	APÊNDICE D – MATRIZ COMPARATIVA (UTILIZADA NA APLICAÇÃO DO MÉTODO) E RESULTADO DA PRIORIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS (CONCEITOS) EM RELAÇÃO AOS CRITÉRIOS DOS ITENS DAS RBMS	144

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO EM SEU ÂMBITO GERAL

O Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) vem sendo muito explorado e difundido ao longo dos anos. Porém, é possível se observar que, na maioria das vezes, a importância e os esforços dedicados estão voltados para quesitos relacionados ao processo de manufatura em si que, logicamente, apresenta um papel determinante no ciclo de vida do produto, bem como afeta consideravelmente o lucro de uma determinada empresa. Pelo fato da manufatura apresentar pontos de melhorias mais evidentes e destacados, tornou-se um alvo para detecção de oportunidades dentro das organizações e, acabou conquistando forte espaço dentro do PDP, sendo que seus requisitos endereçados dentro da etapa de projeto detém maior apelo. Por outro lado, pelo fato da manufatura ser o alvo de exploração de oportunidades de melhoria, pode-se dizer que, atualmente, a maioria das empresas já lança mão destas técnicas, o que torna esses requisitos dentro do projeto algo necessário para o produto se tornar competitivo, e não um diferencial no mercado.

Com os processos de globalização cada vez mais difundidos, a troca de informações cada vez mais rápida e simplificada e, com a possibilidade de introduzir um mesmo produto em novos mercados, ameaçando então os fornecedores atuais, surgiu a necessidade de exploração de novas oportunidades dentro do PDP. Ou seja, oportunidades que apresentem diferenciais para o consumidor final. Baseado nesta necessidade, novos departamentos ganharam força ou até mesmo foram introduzidos e inseriram suas atividades dentro do PDP. Entre algumas dessas áreas pode-se citar: pós-vendas, treinamento técnico, entre outras. Coubalibaly, Houssin e Mutel (2008) comentam que o PDP atualmente chegou ao seu limite, e os conhecimentos devem ser aprimorados em questões ambientais e do ciclo de vida de produto para a criação de novas vantagens competitivas. No mercado automotivo de veículos leves, por exemplo, é cada vez mais comum observar-se ofertas e promoções que entregam produtos com vários anos de garantia, o que acaba representando um diferencial de segurança quando o cliente adquire o produto. Por outro lado, para quem oferece este produto no mercado, acaba acrescentando anos de duração ao vínculo cliente – fornecedor, pois para que uma garantia possa ser cumprida, o cliente necessariamente deve realizar as manutenções básicas e

substituição de componentes de desgaste em uma rede de concessionários autorizados. Desta forma, supõe-se que um produto depois de comercializado não perde o vínculo com o fornecedor e, sim, continua trazendo lucros por um determinado número de anos. Este é um exemplo clássico onde o departamento de pós-vendas pode participar no PDP, pois definir uma estratégia de apenas vincular o cliente por um determinado número de anos não é suficiente. Ações e requisitos de pós-vendas devem ser considerados, para que as equipes de engenharia realmente visualizem a necessidade do ponto de vista do cliente e cumpram com as demandas, passando, desta forma, um sentimento para o consumidor de que produtos e serviços estão sendo comercializados de forma justa, clara e otimizada, fidelizando o mesmo para as gerações de produtos futuros.

O departamento de pós-vendas é uma das áreas que apresenta participação importante no PDP, estando presente nos mais diversos segmentos da indústria. Para um estudo mais detalhado e, visando focar uma linha de pesquisa, o setor automobilístico de veículo pesados foi selecionado por apresentar produtos / veículos de grande valor agregado e que são adquiridos para geração de renda, onde sua disponibilidade para executar a tarefa para que o mesmo foi destinado é um fator fundamental, e que impacta diretamente no lucro gerado por este produto. Portanto, as ações de pós-vendas neste segmento possuem uma grande relevância no ciclo de vida do produto.

Quando se fala na atividade de pós-vendas dentro de uma organização automotiva voltada para a fabricação de veículos pesados, a ideia ainda se torna bastante abrangente, pois vários departamentos dentro da organização estão sendo relacionados. Estratificando o pós-vendas em subáreas podem-se observar departamentos relacionados a peças e serviços, sendo que estes estão diretamente ligados ao quesito disponibilidade. Segundo Moscheto (2009), o grau de disponibilidade é diretamente ligado à facilidade de acesso ao componente causador da indisponibilidade (Figura 1), massa do componente a ser manipulada (relacionado à ergonomia), facilidade de diagnose, utilização ou não de ferramental exclusivo para realizar o reparo, disponibilidade de peças de reposição e material técnico de apoio, tempo necessário para a realização do reparo ou uma intervenção de manutenção, entre outros. Primeiramente, é importante salientar que segundo Blanchard e Fabrycky (2006), manutenção é a constituição de uma série de ações

necessárias para restabelecer (manutenção corretiva) ou manter um produto (manutenção preditiva e preventiva), em seu estado operacional. Ou seja, esta definição está diretamente ligada ao produto acabado. Portanto, o termo empregado durante o PDP para que se obtenham condições apropriadas para manutenção do produto é manutenibilidade.



Figura 1 - Manutenção de um veículo comercial¹
Fonte: Adaptado de *Volvo Trucks Image Gallery* (2014).

A inserção de requisitos de pós-vendas relacionados à atividades de serviços prestados na rede de concessionária para a obtenção de ganhos de manutenibilidade, muitas vezes, ainda se depara com uma série de barreiras que devem ser contornadas. Partindo do ponto de que o fluxo de troca de informações entre departamentos ocorre nos dois sentidos nesse processo, ou seja, entre engenharia e pós-vendas, é possível perceber que deficiências existem nos dois lados. Em engenharia de desenvolvimento de produto, muitas vezes, trabalham profissionais totalmente desprovidos de conhecimentos básicos de manutenibilidade, que acabam desenvolvendo soluções totalmente desalinhadas com a ideia principal, gerando grandes retrabalhos durante o processo de projeto. Por outro lado, atualmente, é possível observar profissionais de pós-vendas que não estão preparados para trocar informações técnicas com o departamento de desenvolvimento, não pelo fato de não possuírem ou conhecerem o produto tecnicamente, mas, sim, por não dominarem ou deterem acesso às ferramentas de

¹ Todas as figuras, Tabelas e Quadros sem identificação explícita da fonte foram produzidas (os) pelo autor da dissertação.

² VRML - *Virtual Reality Modeling Language*, é um padrão de formato de arquivo para realidade

desenvolvimento, que permitam a troca de informações utilizando uma mesma linguagem (pode-se citar os sistemas PDM e CAD). Outro fator significativo e importante nos processos de requisitos de serviço demandados por pós-vendas, é a dificuldade em mensurar ganhos que são possíveis de se obter com a nova solução, já que a disponibilidade está diretamente ligada ao fator tempo de reparo e que, na maioria das vezes somente pode ser mensurado em um protótipo físico da solução ou no produto acabado. Vale ainda considerar que nem sempre um reparo feito em um curto espaço de tempo é uma ação que está alinhada com os conceitos de manutenibilidade.

1.2 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE

Tomando como base a ideia apresentada na introdução, pode-se identificar que, atualmente, existe a oportunidade de envolvimento das necessidades e requisitos de pós-vendas dentro do PDP. Porém, ainda ocorrem deficiências e, de certa forma, conflitos no modo de troca de informações bilaterais entre os departamentos de engenharia e pós-vendas, existindo uma dificuldade de valoração do atingimento de requisitos durante a fase de desenvolvimento.

A falha na comunicação interdepartamental quando se envolvem requisitos de manutenibilidade é citada por MIL-HDBK-470A (1997), que diz: “Desenvolver um produto que seja fácil de operar, montar, e manter é, normalmente, dificultado pela comunicação ineficiente entre o time de projeto e o pessoal habilitado para operar, montar ou manter um equipamento existente ou similar.” A falta de troca de informações também é relatada por Zimmerman; Bergsjö; Malmqvist, (2006) que apontam deficiência e falta de conexão no conhecimento entre departamentos.

A forma de se alcançar uma comunicação mais eficiente durante o processo de desenvolvimento de produto (PDP) pode ser buscada através de requisitos dos mais diversos departamentos que serão propostos e avaliados. Dentre eles, tem-se os requisitos de manutenibilidade propostos por pós-vendas. Esses requisitos servem como base para elaboração de alternativas diversas que compõe o conjunto solução. Dentre as alternativas presentes no conjunto solução, pode-se ter alternativas em harmonia ou conflitantes. As alternativas em harmonia, a princípio não apresentam motivos para discussão ou uma avaliação mais profunda. Sua

implementação necessita apenas ser assegurada. Em contrapartida, as alternativas conflitantes, provenientes de diferentes departamentos, necessitam de uma avaliação mais elaborada. Ou seja, argumentos consistentes que suportem uma decisão. Neste momento, o departamento de pós-vendas identifica uma lacuna. Ou seja, existe um conhecimento referente a manutenibilidade adquirido ao longo dos anos. Esses conhecimentos são traduzidos em requisitos durante a fase de projeto. Porém, apesar dos requisitos passarem a nítida impressão do seu benefício aos membros da equipe de projeto, os mesmos perdem sua força pela ausência de métricas embasadas tecnicamente para elencar e mensurar os benefícios gerados por estes requisitos. Isto pode favorecer a criação de falsos *bussiness cases*, fazendo com que custos futuros significativos, como os de manutenção, sejam deixados de lado.

Analisando dados expostos por Blanchard, Verma e Peterson (1995) observa-se que cerca de 75% dos custos de um produto ao longo do seu ciclo de vida, não são endereçados durante o PDP. Este efeito denominado “iceberg” pode ser observado na Figura 2.

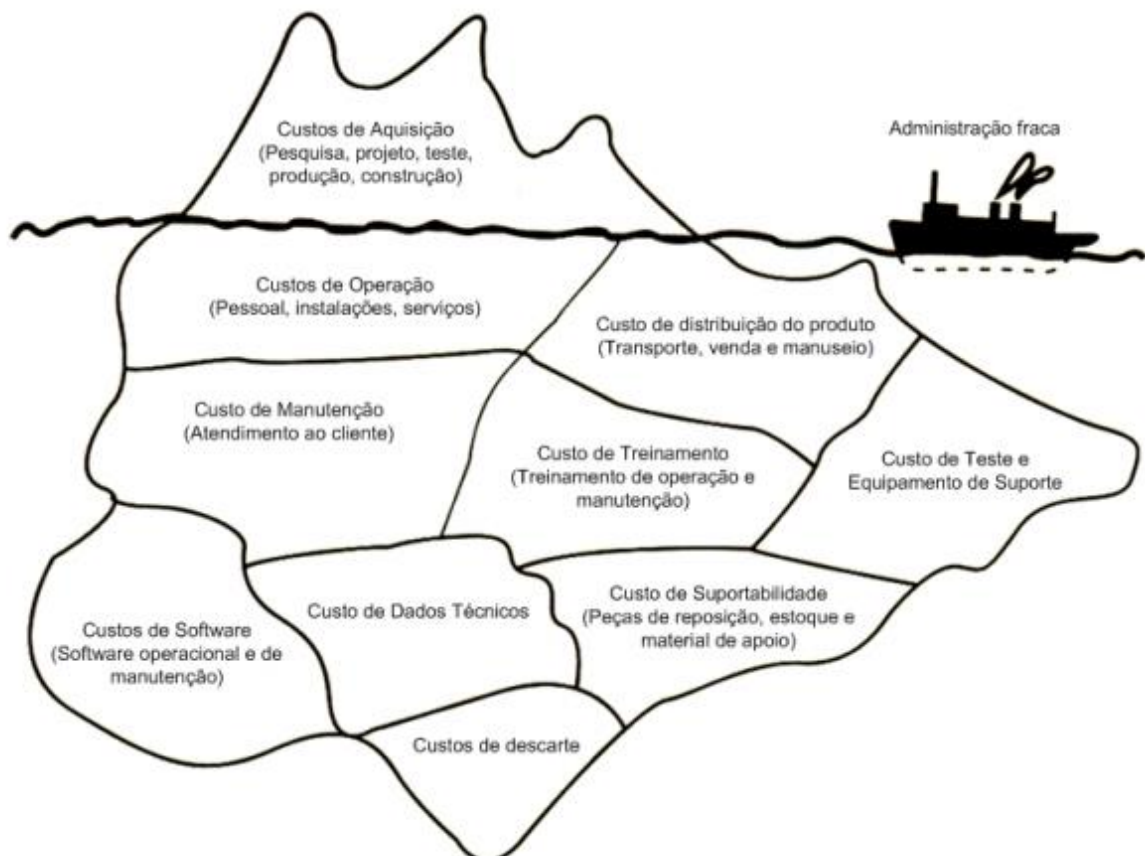


Figura 2 - Custo total de um produto ao longo do seu ciclo de vida
Fonte: Adaptado de Blanchard, Verma e Peterson (1995).

Espera-se, portanto, que este trabalho propicie um mecanismo de análise de requisitos de manutenibilidade endereçados por pós-vendas, possibilitando a visualização de parâmetros de decisão tais como indicadores de desempenho de manutenibilidade que suportem o ranqueamento de soluções novas ou existentes, e que são pertencentes ao conjunto solução. Estabelece-se, desta maneira, um canal de comunicação embasado tecnicamente entre pós-vendas e os demais membros pertencentes ao time de projeto. Desta forma, este mecanismo visa garantir que os desejos do consumidor final do ponto de vista de manutenção sejam traduzidos em requisitos que adquirem força ao longo do PDP, devido ao fato de serem suportados corretamente e tecnicamente. Como consequência do atingimento destes requisitos, na categoria de serviços desempenhados na rede de concessionários autorizados, busca o aumento do desempenho e qualidade do serviço, visando assim à eficiência dos serviços ofertados, disponibilidade do produto, fidelização do cliente e aumento da margem de lucros nos contratos de serviços. Um produto melhor elaborado do ponto de vista de manutenibilidade durante as etapas do PDP reduz consequentemente os custos futuros com manutenção conforme ilustra a Figura 3.

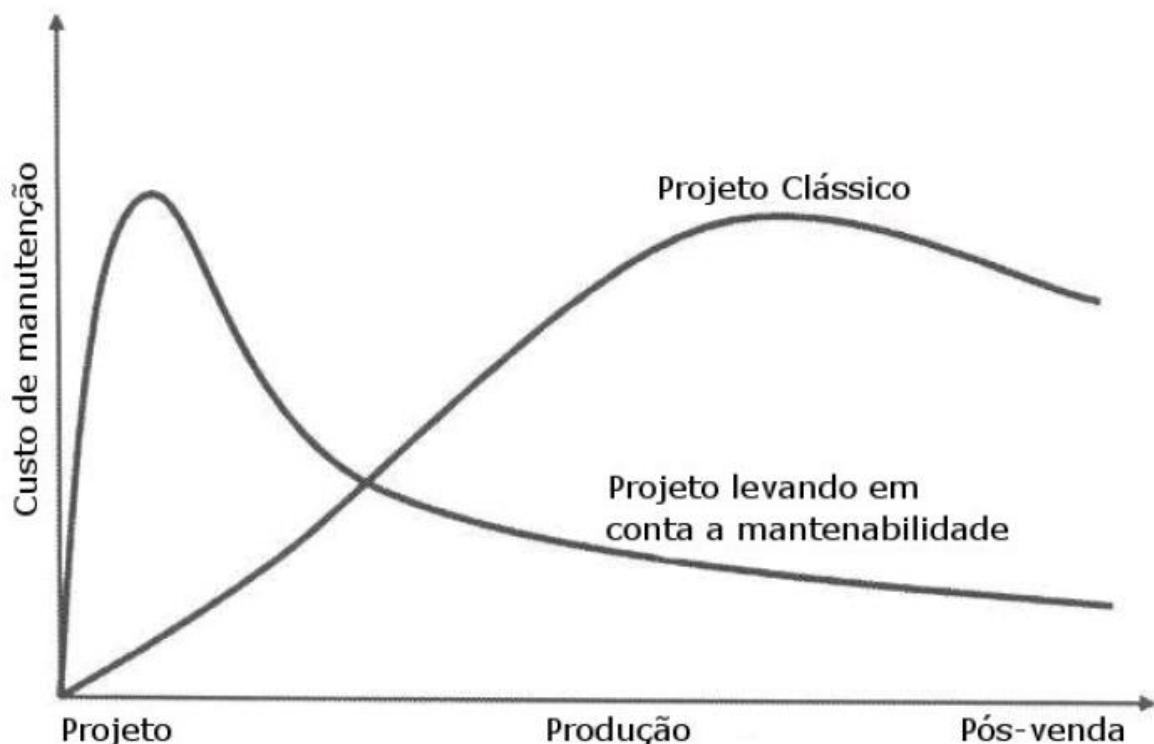


Figura 3 - A importância de requisitos de manutenibilidade no processo de PDP
Fonte: Adaptado de Slavila, Decreuse e Ferney (2005).

1.3 OBJETIVOS DO PROJETO

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma sistemática para acoplar ferramentas CAD, ferramenta de análise de rotas de desmontagem de conjuntos mecânicos e regras chaves de manutenção, para produzir uma análise classificatória que subsidie o engenheiro de serviço juntamente com os demais membros do time de projeto na avaliação e seleção, durante o PDP, de conceitos que melhor suportem diretrizes de manutenibilidade. Também, espera-se aprimorar a colaboração entre o desenvolvimento de produto e pós-vendas através de uma linguagem única de comunicação.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos desse estudo têm-se:

- a/ Identificar regras gerais de manutenção aplicadas ao escopo de manutenibilidade;
- b/ Integrar mecanismos de definição de rotas e sistemas CAD;
- c/ Examinar mecanismos de tomada de decisão passíveis de acoplamento ao contexto de manutenibilidade.

1.4 JUSTIFICATIVAS

Como justificativas desse estudo têm-se:

- 1/ Maximização dos lucros de pós-vendas através da viabilização durante o PDP da avaliação, seleção e endereçamento de conceitos que melhor suportem requisitos de manutenibilidade, proveniente da captura da necessidade dos clientes durante o ciclo de vida do produto, até então, muitas vezes subjetivos;
- 2/ Obtenção de um mecanismo padronizado, técnico e com indicadores numéricos para tomada de decisão dentro da equipe de projeto,

estabelecendo uma linguagem comum entre engenharia de desenvolvimento e pós-vendas;

- 3/ Redução do tempo de reparo e aumento na disponibilidade do produto;
- 4/ Melhoria da manutenção preventiva;
- 5/ Redução do custo de manutenção;
- 6/ Aumento da lucratividade de contratos de manutenção.

1.5 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem proposta para o trabalho foi teórico-prática. Um levantamento bibliográfico foi necessário para suporte e desenvolvimento da ideia. Aplicações de conhecimentos práticos de vivência do autor na indústria automotiva, ambientes de manutenção e técnicas computacionais também foram levadas em consideração na metodologia de pesquisa.

De acordo com Silva e Muszkat (2000), a pesquisa deve ter um caráter pragmático, pois possui um processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos.

A pesquisa desenvolvida, do ponto de vista da sua natureza, foi pesquisa aplicada, pois proveu conhecimento e ferramentas para aplicação prática na solução de um problema específico. Ou seja, valoração de requisitos de manutenibilidade durante as etapas do PDP por meio do suporte de ferramentas de modelagem, em conjunto com tecnologias de planejamento e estudo de rotas de remoção de componentes.

1.6 ESTRUTURA DO ESTUDO

A Figura 4 apresenta a estrutura proposta para a condução da presente investigação.

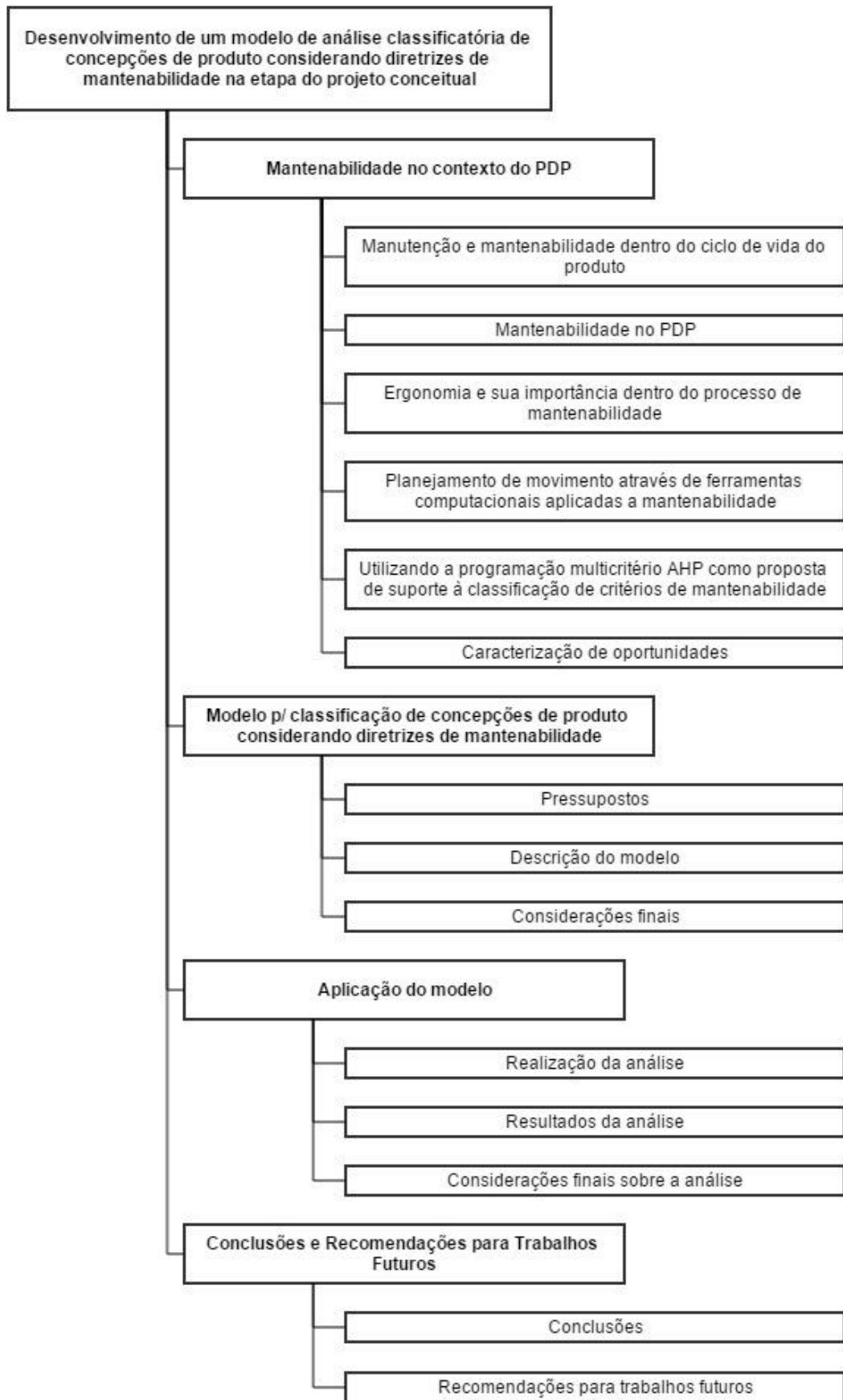


Figura 4 – Estrutura do estudo

No capítulo 1, uma introdução e caracterização do problema macro são realizadas seguidas por um direcionamento da ideia em linha com a área de pesquisa sugerida pelo autor.

O capítulo 2 explora as informações disponíveis atualmente no PDP, estudo de rotas para remoção de componentes, requisitos propostos na literatura sobre manutenibilidade e a utilização de uma ferramenta de tomada de decisão, utilizando-se multicritérios.

No capítulo 3, apresenta o processo adotado para o desenvolvimento da análise classificatória de concepções de produto, considerando diretrizes de manutenibilidade no projeto conceitual foi apresentado. A partir das informações levantadas na pesquisa bibliográfica e, da coleta de dados de campo referentes à manutenção ao longo dos anos, definiram-se as premissas que o método deveria atender.

O capítulo 4 tem por intuito validar o método proposto, através da aplicação do mesmo em um experimento realizado em ambiente controlado. Neste caso, três alternativas pré-definidas foram escolhidas e submetidas aos procedimentos do método.

O capítulo 5 apresenta as conclusões, contribuições e recomendações para trabalhos futuros.

2 MANTENABILIDADE NO CONTEXTO DO PDP

2.1 MANUTENÇÃO E MANTENABILIDADE DENTRO DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO

Segundo Blanchard, Verma e Peterson (1995), dentro do ciclo de vida de um produto vários fatores compõem o seu custo. Dentre eles tem-se:

- a/ Pesquisa e desenvolvimento;
- b/ Produção e construção;
- c/ Operação e manutenção;
- d/ Retirada e descarte.

É possível visualizar uma estratificação mais detalhada desses custos em Blanchard e Fabrycky (2006), na Figura 5.

Pahl et al. (2005) citam que, produtos em uso ou não podem apresentar suas condições fora de parâmetros estabelecidos como ideais para operação, pois estão sujeitos a:

- a/ Desgastes e quebras;
- b/ Redução da vida útil;
- c/ Corrosão;
- d/ Contaminação e mudanças nas propriedades de materiais.

Com um produto desenvolvido favoravelmente as eliminações desses fatores através da atividade de manutenção, automaticamente está se reduzindo o custo de utilização de um produto durante o seu ciclo de vida. A anulação desses fatores e reestabelecimento do produto ao seu estado original denomina-se manutenção.

A manutenção é uma atividade que somente pode ser realizada em um produto acabado. Quando existe o intuito de se obter melhoras nessa área o quesito manutenibilidade deve ser endereçado ao longo do PDP.

Segundo Pahl et al. (2005), na seleção dos requisitos de manutenção, variantes de fácil manutenção devem ser preferidas. Exemplos disso são os aspectos que exigem quantidades menores de reparos e incluem componentes que

podem ser trocados facilmente, priorizando ainda a utilização de elementos com a expectativa de vida semelhante. Durante o PDP, é importante considerar a acessibilidade e facilidade de montagem e desmontagem. Porém, sempre garantindo que essas ações tomadas não comprometam a segurança.

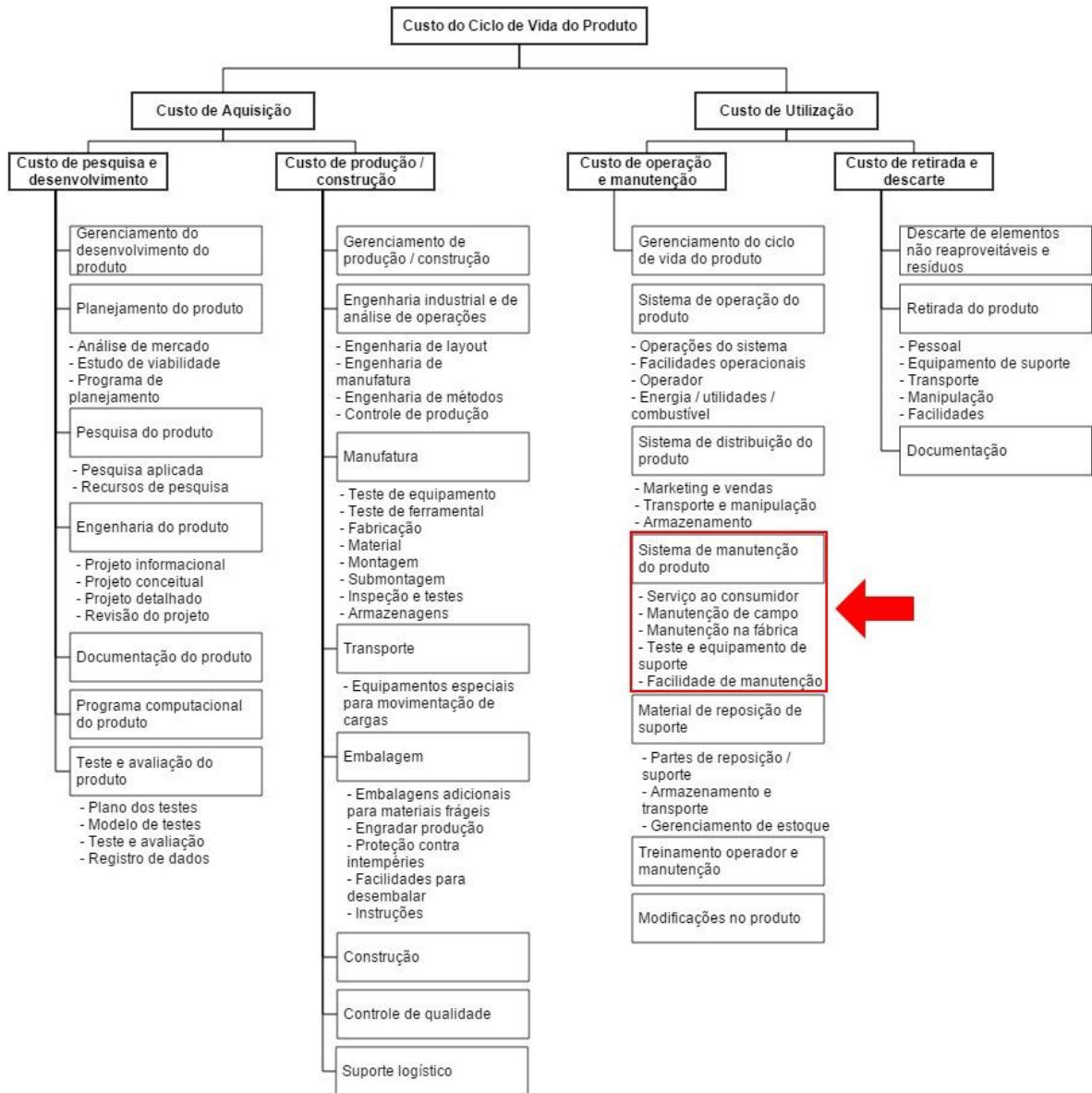


Figura 5 - Estratificação dos custos de um produto durante seu ciclo de vida
 Fonte: Adaptado de Blanchard e Fabrycky (2006).

A solução escolhida deve incorporar características que fazem a manutenção desnecessária ou, reduzi-la substancialmente e, quando tais características não podem ser realizadas, ou a solução apresenta custo elevado, medidas de controle devem ser introduzidas.

Durante o processo de manutenção os seguintes objetivos são importantes:

- a/ Evitar danos e aumentar a confiabilidade;
- b/ Evitar a possibilidade de erros durante a desmontagem, montagem e *startup*;
- c/ Simplificar os procedimentos de serviço;
- d/ Fazer com que os resultados de manutenção sejam verificáveis;
- e/ Simplificar os procedimentos de inspeção.

Algumas medidas técnicas que podem reduzir as atividades de serviço e inspeção e devem ser consideradas já na fase conceitual são:

- a/ Preferir mecanismos auto ajustáveis;
- b/ Focar na simplicidade e pequeno número de peças;
- c/ Utilizar componente padrão;
- d/ Permitir a fácil acessibilidade;
- e/ Prover fácil desmontagem;
- f/ Aplicar os princípios modulares;
- g/ Usar poucas e similares ferramentas de inspeção e serviço.

Para facilitar a execução do serviço e reparo, as seguintes recomendações de ergonomia devem ser aplicadas:

- a/ Os locais de inspeção, manutenção e reparação devem ser facilmente acessíveis;
- b/ O ambiente de trabalho deve seguir requisitos de segurança e ergonomia;
- c/ Visibilidade deve ser assegurada;
- d/ Os processos funcionais e medidas de apoio devem ser claros;
- e/ Localização de defeitos deve ser possível;
- f/ Troca de componentes deve ser fácil.

Como pode ser observado nos itens listados anteriormente, uma série de fatores devem ser levados em consideração. Ou seja, um reparo está alinhado

com conceitos de manutenibilidade quando ele atende uma série de fatores pré-determinados e, não única e exclusivamente, quando ele é executado em um curto espaço de tempo.

2.2 MANTENABILIDADE NO PDP

Tomando como exemplo as fases de projeto sugeridas por Pahl et al. (2005) percebe-se uma evolução do produto em si. Ou seja, iniciando com uma reserva de espaço pura e simples que vai passando por um processo de evolução e refinamento até a chegada de um produto com sua característica final (Figura 6). Quando se considera a área de manutenibilidade não se pode pensar de forma diferente. Requisitos devem ser inseridos nas fases iniciais do projeto. Reservas de espaço devem acontecer nas fases mais preliminares, durante o PDP. Restrições ao atendimento dos requisitos devem ser listadas e enumeradas assim que identificadas, para que a equipe que está envolvida no projeto possua tempo hábil para tratamento de possíveis conflitos sem que isso onere significativamente em custo de ferramental e protótipo no projeto.

Pode-se verificar, também, que Blanchard e Fabrycky (2006) focam o projeto orientado para manutenibilidade em parâmetros como Tempo Médio Entre Falhas (MTTR) e Tempo Médio de Reparo (MTBF). Apesar de serem extremamente minuciosos na elaboração e proposição desta métrica não demonstram de forma clara como que elas devem ser alocadas e distribuídas ao longo do PDP.

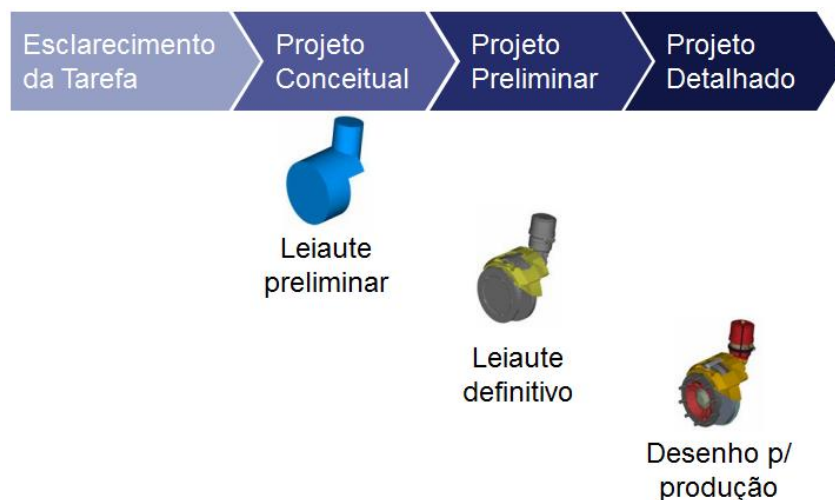


Figura 6 - Fases de concepção de um produto conforme sugerem Pahl e coautores
Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2005).

Desta forma, conclui-se que tanto Pahl et al. como Blanchard e Fabrycky tentam uma aproximação à manutenibilidade ao longo do PDP. Porém, não sugerem a utilização de recursos tecnológicos como as ferramentas CAD e planejamento de rotas aplicadas ao processo de desenvolvimento.

2.2.1 Guias de referência para manutenibilidade

Conforme já citado na seção 2.2, Pahl et al. (2005) e Blanchard e Fabrycky (2006) propõem formas de tratar a manutenibilidade durante o PDP. Como guia de referência também pode-se citar o MIL-HDBK-470 (1997), que diz que um produto manutenível é um resultado de um esforço consciente e dedicado, visando incorporar características no projeto que tornam as manutenções preventivas e corretivas mais fáceis, seguras e econômicas em termos de tempo e recursos. Uma série de regras são sugeridas em um apêndice sobre diretrizes de projeto voltadas para manutenibilidade, um pequeno exemplo extraído do manual pode ser visualizado na Figura 7.

Guideline Nº	Guideline
MATL-12	MATL-12 Leading edge materials and coatings should be durable against fragments from frangible gun port plugs.
MATL-13	MATL-13 Special handling or shipping requirements of repair materials should be avoided.
MATL-14	MATL-14 Leading edges, including chines, containing or constructed of radar absorbing materials, should be interchangeable to reduce vehicle downtime and simplify repairs.
MATL-15	MATL-15 Doors and panels containing blade seals used for signature reduction should be interchangeable or contain interchangeable blade seals. Deviation is acceptable where repairs can be accomplished on the vehicle in a time equal to or less than door or seal remove and replace time.
MC-02	MC-02 Avoid the use of cotter pins, safety wire, safety clips, and similar devices to prevent maintenance-induced events leading to ground vehicle accidents or loss of air vehicles.
MC-05	MC-05 Avoid potential foreign object traps during manufacturing or operational maintenance by eliminating vertical penetrations of plumbing/fittings into tanks, compartments, or cells.
MC-07	MC-07 Maximize areas of constant web thickness in firewalls, carry-through bulkheads, major frames, structural ribs, spars, webs, keels, and close-outs to provide flexibility in locating penetration fittings. Stepped chem milling, stepped machining, stepped composite layup concepts all tend to result in minimal available surface area for penetrations.
MC-08	MC-08 All in-line plumbing connections within a fuel tank or cell should be capable of making/breaking the interface by hand, require no torque, contain integral safety locking mechanisms, and should be void of any requirement for safety wire.
MC-15	MC-15 Route, orient, and position plumbing, wiring, ducts, and connectors sufficiently away from the outer surface of the vehicle to preclude induced damage due to minor dents, drill bits during repair, etc. Minimum rule of thumb is 1" away from the inner surface and 1" below a plate nut channel.

Figura 7 – Exemplo de diretrizes de manutenibilidade
Fonte: Adaptado de MIL-HDBK-470 (1997).

2.2.2 Projeto voltado para serviço - DFS

O projeto voltado para serviço denominado também como *Design for Service* (DFS) é uma ferramenta desenvolvida para auxiliar equipes de desenvolvimento de produto a considerar a serviçabilidade em seus projetos. A análise dos procedimentos do DFS envolvem operações de desmontagem e montagem, normalmente efetuadas durante a manutenção, (SUBRAMANI, 1993).

Atualmente, os produtos da indústria moderna (e.g.: automóveis) tornaram-se uma necessidade da sociedade. Por esta razão, a qualidade medida através das normas de confiabilidade é uma característica muito importante para o sucesso no mercado. Além disto, os consumidores esperam que os procedimentos de manutenção sejam realizados com a menor interrupção possível do uso do produto, visando sua disponibilidade. Neste cenário, confiabilidade e serviçabilidade estão alinhadas, tanto na ideia do mentor da solução, quanto na do consumidor.

Um aspecto importante a ser levado em consideração é o *Design for Assembly* (DFA), onde o objetivo é reduzir tanto o número de peças quanto o de elementos de fixação. Esta redução nem sempre significa melhorias na manutenção, porém, quando se desenvolve um produto com este foco, há um potencial para torná-la mais fácil. O desafio é, então, fazer com que as equipes de desenvolvimento atinjam este potencial (DEWHURST; ABBATIELLO, 1996).

É necessário, também, ressaltar a importância da engenharia simultânea para que haja uma cooperação entre as equipes (e.g.: Manufatura, Pós-venda). A engenharia simultânea é verificada em poucas empresas, onde engenheiros do pós-venda não são quase ouvidos durante as fases do desenvolvimento de produto. Para Dewhurst e Abbatiello (1996) isto se deve, às vezes, pelo fato de os engenheiros de pós-venda não possuírem as ferramentas necessárias para serem proativos no desenvolvimento de produto. Geralmente, faz-se necessário esperar até o leiaute definitivo do produto para assim sugerir mudanças, se ainda possível.

2.2.2.1 Procedimento do DFS

O procedimento para tratar da serviçabilidade no projeto baseia-se na simulação dos processos de desmontagem e montagem, considerando todas as etapas da atividade. Tabelas são montadas para que se tenha uma organização eficiente dos dados obtidos, utilizando os tempos base da serviçabilidade. Cria-se, assim, uma tabela com os tipos de operações a serem realizadas e seus respectivos códigos, conforme Tabela 1.

Para tal, são usados tempos de serviço encontrados em Abbatiello, (1995). Estudos de caso com produtos foram realizados para a validação destes tempos base de serviço.

Tabela 1 – Operações de serviço e seus respectivos códigos

Tabela de itens desmontados	Código
...	...
Tempo de desmontagem para itens soltos	15
Tempo de desmontagem para parafusos ou porcas usando parafusadeira	16
Tempo de desmontagem para parafusos ou porcas usando chaves de fenda manuais	17
Tempo de desmontagem para parafusos ou porcas usando chaves de boca	18
...	...

Fonte: Adaptado de Dewhurst e Abbatiello (1996)

Para cada operação, cria-se outra tabela onde os tempos estão organizados de uma forma que se tenha o tempo “ideal” para cada condição do serviço, conforme Tabela 2. Desta forma, por exemplo, o código 1721 se refere ao código do serviço 17, linha de índice 2 e coluna de índice 1, que significa a desmontagem de um parafuso utilizando uma chave de fenda, onde o acesso é restrito e a visão é baixa, sendo a sua remoção considerada difícil.

A primeira parte do procedimento consiste em organizar uma tabela de desmontagem, imaginando todas as operações a serem realizadas para que se chegue até a peça que se almeja. Esses 'tempos' são computados em uma tabela. Se a montagem contém sub-montagens, então essas são tratadas como 'partes', computando apenas um tempo.

Tabela 2 – Tempo (s) de desmontagem para parafusos ou porcas usando chaves de fenda manuais

Tabela código 17		Desmontagem fácil	Desmontagem difícil	Severas condições de desmontagem	Tempo adicional por revolução
		0	1	2	3
Sem dificuldades de acesso ou visão	0	8	14.3	28.2	1.2
Acesso difícil ou visão restrita	1	11.3	20.2	39.8	1.9
Acesso difícil e visão restrita	2	14.8	26.5	52.1	2.6
Severas condições de acesso	3	19.9	35.7	70.3	3.6

Fonte: Adaptado de Dewhurst e Abbatiello (1996)

A eficiência da serviçabilidade no desenvolvimento de produto depende da consideração de cada operação de desmontagem e itens removidos, julgando o quão eles são necessários, a partir de três critérios. Verifica-se: i/ a sub-montagem é/ou contém a peça para a manutenção ou é a operação de manutenção em si; ii/ a sub-montagem é uma cobertura ou proteção da peça para a manutenção; iii/ e a sub-montagem precisa ser removida para se chegar a peça para a manutenção ou se a sub-montagem contém a peça para a manutenção.

Apenas os itens de uma montagem que se enquadre em um desses três critérios são considerados no procedimento de manutenção. Se o item de uma montagem não se enquadra em nenhum dos três critérios, então este recebe o valor '0' na tabela. Após o término da tabela de desmontagem, faz-se outra tabela para a remontagem do sistema.

Quando as tabelas são completadas, pode-se, então, calcular o tempo de serviço gasto para a manutenção do sistema. O tempo total – T_s é obtido pela soma do tempo de desmontagem - T_d com o tempo de remontagem - T_r , conforme equação (1). O tempo de serviço ideal para uma manutenção é aquele que requer o menor tempo para a remoção e reinstalação da peça.

$$T_s = T_d + T_r \quad (1)$$

Onde:

T_s = Tempo total

T_d = Tempo de desmontagem

T_r = Tempo de remontagem

Para determinar o tempo ideal do serviço as seguintes suposições devem ser consideradas: i/ todas as peças necessárias para o serviço são facilmente acessíveis dentro da área de trabalho; ii/ na metodologia do DFA (BOOTHROYD, 1980), para que se estime o menor tempo de montagem possível, assume-se que um terço das peças são fixadas imediatamente por um sistema de auto fixação, ou seja, leva-se em consideração que uma a cada três peças precisam ser desafixadas e reafixadas, por um método eficiente. Usando estas suposições, o tempo ideal de serviço é dado pela equação (2).

$$T_{min} = \frac{2 \times T_{ds} + T_{dg}}{3} + \frac{2 \times T_{ms} + T_{mg}}{3} + T_{aq} + T_e \quad (2)$$

Onde:

T_{min} = Tempo ideal de serviço

T_{ds} = Tempo de desmontagem para item solto

T_{dg} = Tempo de desmontagem para item com garras de apoio

T_{ms} = Tempo de montagem para item solto

T_{mg} = Tempo de montagem para item com garras de apoio

T_{aq} = Tempo de aquisição

T_e = Tempo de espera

Depois que o tempo ideal de serviço é calculado, é possível calcular a eficiência do tempo base de serviço, conforme a equação (3).

$$\eta_{\text{tempo}} = \frac{T_{\text{min}} \times N_m}{T_s} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

η_{tempo} = Eficiência do tempo base de serviço

N_m = Número de peças removidas ou operações que influenciam no serviço

T_s = Tempo previsto para a realização do serviço

Para que se calcule o tempo de serviço base eficientemente é proposto que os tempos de cada peça tenham 'pesos' diferentes levando-se em consideração a frequência de falhas de cada componente. Assim, obtendo-se um valor mais compatível com a realidade como mostra a equação (4).

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\eta_1 \times f_1 + \eta_2 \times f_2 + \dots + \eta_n \times f_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n} \quad (4)$$

Onde:

η_{total} = Tempo de serviço base

$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ = Eficiência do tempo base para os serviços 1, 2, ..., n

f_1, f_2, \dots, f_n = Frequência média de falhas para os itens 1, 2, ..., n

Caso o tempo de serviço obtido for considerado inadequado, quando comparado a um projeto de referência já existente, então é preciso que a montagem do sistema seja reprojeta, focando na simplificação da estrutura de montagem, usando métodos eficientes de desmontagem e permitindo um fácil acesso a peça na qual será realizada a manutenção.

2.2.2.2 Otimização do DFS

A otimização de um produto para uma manutenção fácil é fundamentalmente diferente da otimização de um projeto para a montagem. Pois para a montagem, o

objetivo é simplesmente redução do tempo de montagem e/ou custo. Na serviçabilidade, por outro lado, é inevitável o conflito entre os diferentes tipos de manutenção que podem ser executados. No projeto orientado para a serviçabilidade ideal tem-se que todos os itens são trocados e todas as operações de manutenção são realizadas. Naturalmente, isto não ocorre na maioria dos casos. Decisões precisam ser tomadas e as peças devem ser facilmente acessíveis. Não deixando de lado a ideia de que o tempo de reparo está diretamente relacionado com a precificação do serviço de manutenção.

O procedimento é baseado no conhecimento das possibilidades de falhas do componente, a frequência de ocorrência delas e suas consequências para o componente. O FMEA é utilizado como sistemática para atingir os objetivos da serviçabilidade. Quando o FMEA é concluído, todos os modos de falhas são identificados, suas detecções documentadas, as frequências de falhas são gravadas, e seus efeitos no sistema como um todo bem seus potenciais de criticidade de falha são considerados. Após a conclusão de um FMEA bem preparado, a equipe de projeto será beneficiada por ter identificado as áreas de fraquezas no projeto, direcionando recursos para melhorias nestas áreas em específico.

2.3 ERGONOMIA E SUA IMPORTÂNCIA DENTRO DO PROCESSO DE MANTENABILIDADE

Esta seção visa destacar o papel da ergonomia no âmbito de chamar a atenção de sua correlação e importância com as atividades de manutenção. Vale ressaltar que, uma análise correta de ergonomia deve ser executada por um profissional habilitado da área de saúde. Na Figura 8 é possível observar um exemplo de um operador em uma determinada posição para manutenção e as dimensões mínimas admissíveis.

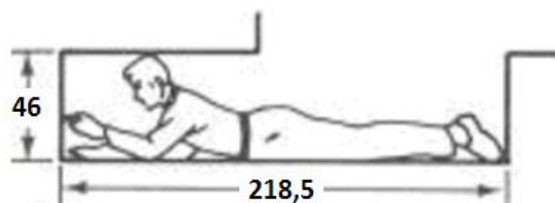


Figura 8 - Ergonomia e espaço para posição de trabalho (cm)
Fonte: Adaptado de Blanchard, Verma e Peterson (1995).

Na Figura 9 e na Figura 10, é possível visualizar uma parte do corpo (no caso uma mão) de um operador utilizando algumas ferramentas de reparo universal. Importante observar que algumas medidas e/ou dimensões podem ser adicionadas para uma mesma parte do corpo, em função da posição para operação.

Fazendo-se uma avaliação do ponto de vista ergonômico voltado para a área mecânica, pode-se verificar que este processo é raramente tratado dentro do PDP. Comumente é possível observar que uma reserva de espaço foi considerada para um componente e/ou uma ferramenta. Porém, o acesso à região em questão e a manipulação do componente e/ou ferramenta por uma pessoa torna-se difícil, colocando em risco a saúde física da pessoa, comprometendo a qualidade final da tarefa executada e acrescentando tempo à manutenção do componente.

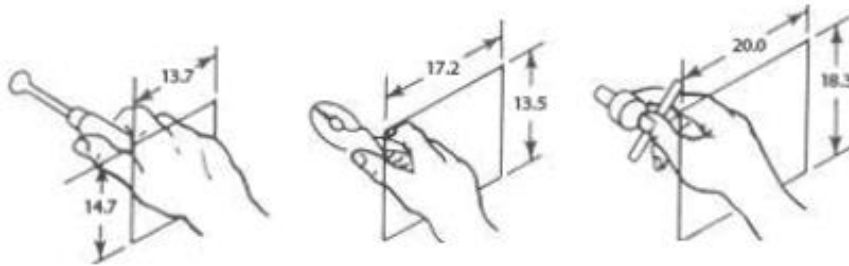


Figura 9 - Ergonomia e espaço para posição de trabalho (acesso horizontal) com a utilização de ferramenta universal (cm)

Fonte: Adaptado de Blanchard, Verma e Peterson (1995).

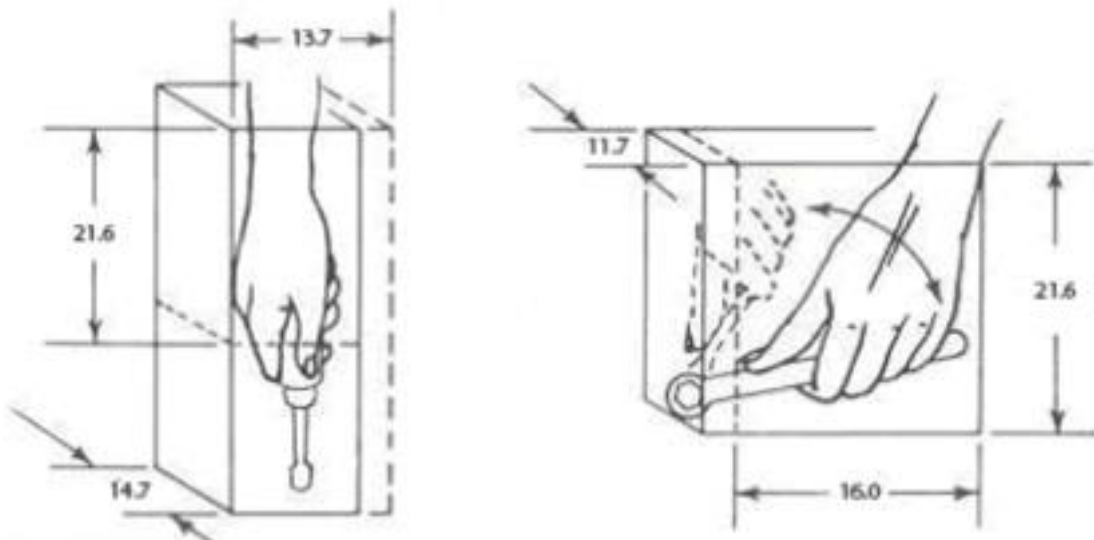


Figura 10 - Ergonomia e espaço para posição de trabalho (acesso vertical) com a utilização de ferramenta universal (cm)

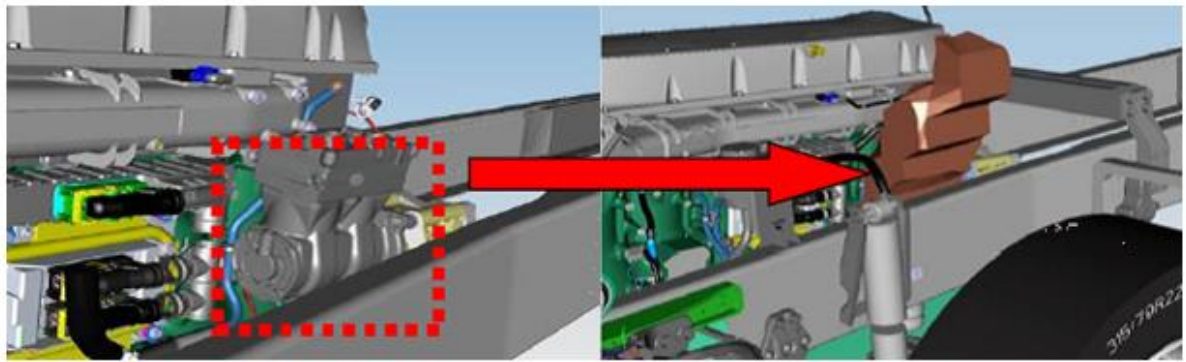
Fonte: Adaptado de Blanchard, Verma e Peterson (1995).

2.4 PLANEJAMENTO DE MOVIMENTO ATRAVÉS DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADOS A MANTENABILIDADE

Segundo Chang e Li (1995), antigamente estudos de manutenibilidade eram conduzidos colocando-se as demandas e, após a elaboração de um protótipo físico que ilustrasse a situação, era possível fazer a manipulação de um componente no espaço, verificando se era permitida sua remoção sem nenhuma interferência. Mesmo assim, ainda se tornava quase impossível registrar a rota ou o caminho preferencial para a remoção no espaço. Atualmente, com o emprego de tecnologias CAD dentro do PDP, está cada vez mais fácil e possível fazer este estudo de rota de montagem ou desmontagem de um determinado componente ou conjunto, em um espaço tridimensional, tendo ainda como saída uma nuvem de pontos, plotada no espaço, que representa o caminho desenvolvido pelo componente ou conjunto, e uma alocação dos vetores que representam cada movimentação no espaço. É possível editar os vetores um a um, manualmente, caso o usuário deseje executar alguma alteração em um ponto específico. Por fim, é possível registrar o volume descrito e exportar o mesmo para outro *software* através de arquivos de troca de dados de componentes tridimensionais.

A ideia de estudo de rotas de montagem e desmontagem surgiu em grande escala na indústria robótica, e seu algoritmo foi traduzido para o sistema CAD. O que se busca é um algoritmo que analise os seis graus de liberdade disponíveis no espaço e utilize as possibilidades existentes para deslocar um componente ou conjunto no espaço de sua situação inicial até a final, que são dados de entrada fornecidos previamente pelo usuário.

Moscheto et al. (2011) em seu estudo demonstram um volume solidificado como uma proposta de reserva de espaço para a remoção de um compressor aplicado em veículos pesados. Esta reserva de espaço demonstra para as equipes de projeto que não somente a instalação do compressor deve prover acesso aos componentes de fixação, Figura 11 – (a), mais sim os componentes montados ao redor do componente em questão devem propiciar espaço tridimensional suficiente para a remoção do mesmo, conforme pode ser observado na Figura 11 – (b).



a) Compressor Montado

b) Area necessária ao redor do compressor

Figura 11 - Compressor de um veículo comercial com rota solidificada (*swept volume*).

Fonte: *Distribution of 3D Visualization data for aftermarket* (2009)

Ainda, é possível simular partes do corpo de um determinado mecânico durante a tarefa de manutenção, incluindo assim o espaço ocupado pelo profissional para que uma correta reserva de volume seja feita, Figura 12 - (3).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, os modelos tridimensionais de ferramentas utilizadas durante a tarefa de manutenção, também podem ter seus volumes representados no espaço através de uma nuvem de pontos, o que possibilita uma visualização e troca de informações entre sistemas CAD (Figura 13).

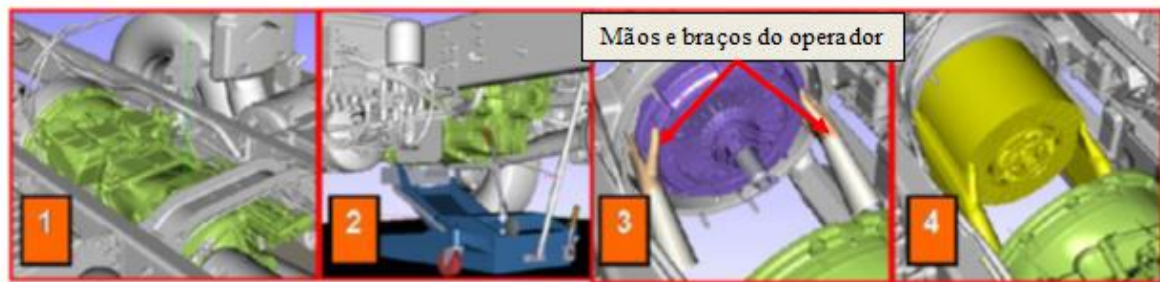


Figura 12 - Troca de um disco de embreagem em um veículo comercial

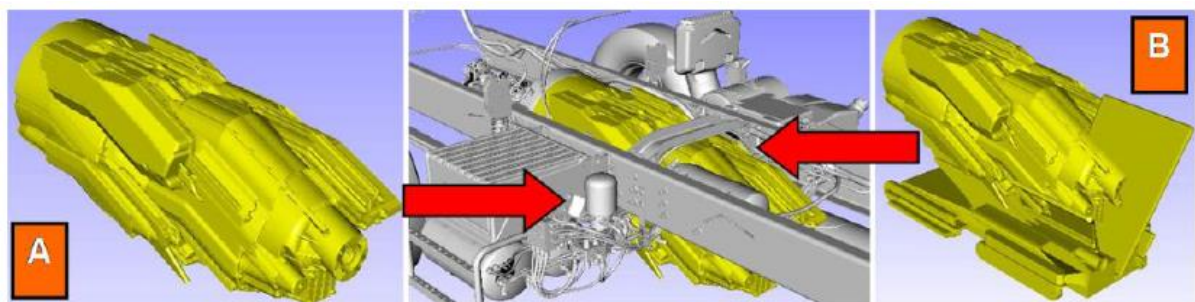


Figura 13 - Solidificação da rota de saída de uma caixa de transmissão

2.4.1 Planejando rotas de saída - *Path Planning*

Atualmente, a automação tem se desenvolvido a uma velocidade elevada, impactando em quase todas às áreas do cotidiano. A criação de sistemas automatizados é de grande interesse de vários campos, tais como: manufatura, exploração espacial e submarina, construção civil e cirurgias médicas (TAVARES, MARTINS; TSUZUKI, 2011). Nestes campos, muitos esforços são realizados para solucionar problemas de Planejamento de Rotas (*Path Planning*).

Path Planning é a otimização de trajetórias por um agente móvel são clássicos problemas da aprendizagem de máquina. Estes agentes móveis estão em vários ambientes e, apesar de serem diferentes em cada um deles, consistem basicamente dos mesmos elementos, tais como: a posição inicial, um ou mais obstáculos e a posição final. Para se chegar ao objetivo, fazem-se movimentos para evitar os obstáculos e, assim, alcançá-lo. Depois de atingido o objetivo, usa-se a informação aprendida sobre o ambiente utilizado para aperfeiçoar o caminho até a posição final (MEGHERBI; MALAYIA, 2010).

Neste contexto, o planejamento da montagem tem um impacto significativo no tempo de entrega, custo, qualidade, durabilidade, bem como, na manutenção. Por isto, o planejamento da montagem tem um papel crucial no sucesso do produto, principalmente, em produtos complexos, tais como aviões, navios e automóveis. Para este fim, são desenvolvidos vários *softwares* que auxiliam os projetistas com os recursos da montagem digital.

Em comparação com os métodos tradicionais, a montagem digital pode melhorar a eficiência do planejamento de montagem, reduzir as possibilidades de falha, encurtar o tempo de entrega e reduzir custos da montagem. O uso de *software* CAD é hoje uma realidade, em função da complexidade do produto a se desenvolver.

Alguns *softwares* têm ferramentas precisas que auxiliam o planejamento e estudo da montagem de produtos. Dentre os *softwares* de *path planning*, alguns se destacam no estudo virtual de manutenibilidade, tais como: Catia Composer, Delmia e IPS – *Path Planner*. Além da capacidade de manipulação de sólidos tridimensionais, suas funções que auxiliam a montagem e manufatura, são similares.

O *software* Catia Composer (CATIA, 2015), no estudo e planejamento de rotas de montagem e desmontagem, tem como características principais, ferramentas que possibilitam a detecção de interferência e visualização dinâmica. O *software* Delmia tem várias funções, onde se pode fazer simulações de peças, montagens e simulações de processos de fabricação. Geralmente, esses *softwares* são complexos e caros. O *software* IPS – *Path Planner*, por sua vez, é um *software* dedicado para a simulação de rotas de desmontagem e montagem, possibilitando uma análise mais robusta no que tange trajetórias tridimensionais descritas e expressas por uma nuvem de pontos, análise de colisão durante a desmontagem de uma peça ou subconjunto e, ainda uma visualização gráfica que expressa as regiões de menor distância entre as peças ou componentes que estão sendo deslocados durante o processo de desmontagem ou montagem versus os demais componentes do conjunto que permanecem fixos.

Mesmo existindo vários *softwares* que tratam do planejamento de montagem, ainda assim, esta é uma área onde há muito a se desenvolver. Um dos principais desafios é com relação a montagens complexas, pois a automação aqui é relativamente baixa, do ponto de vista do estudo de manutenibilidade, tornando as análises muito dependentes dos projetistas.

Neste contexto, faz-se necessário municiar os projetistas com uma ferramenta robusta que lhes possa dar uma melhor noção do planejamento de rotas para a desmontagem e montagem (MOSCHETO, 2009).

2.4.1.1 A ferramenta IPS – *Path Planner*

Conforme já citado, o *software* IPS – *Path Planner* é uma ferramenta que possibilita a verificação virtual da desmontagem e subsequente montagem de uma peça ou subconjunto para propósitos de serviçabilidade. O projetista, durante a análise de *path planning*, pode importar um determinado conjunto de geometrias tridimensionais vindos de vários sistemas CAD utilizando uma extensão de arquivo comum para troca de geometrias tridimensionais entre diferentes fabricantes de *softwares* denominada VRML². Na Figura 14 tem-se um exemplo de montagem de

² VRML - *Virtual Reality Modeling Language*, é um padrão de formato de arquivo para realidade virtual, utilizado tanto para a Internet como para ambientes *desktop*. Por meio desta linguagem,

um console e seu respectivo suporte de fixação em um veículo do fabricante *Volvo Cars*.

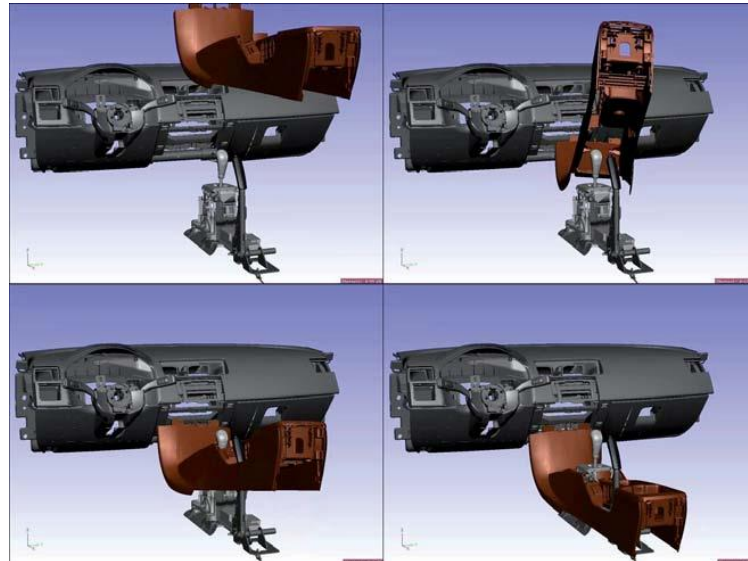


Figura 14 – Verificação da montagem de um console e seu respectivo suporte de fixação no túnel de um veículo
Fonte: *IPS - IPS Path Planner* (2015)

Os passos para uma análise de *path planning* utilizando-se a ferramenta IPS são descritos a seguir:

- a/ Exportação da geometria: todas as geometrias que irão compor o conjunto a ser analisado devem ser exportadas do *software* CAD de origem em formato VRML;
- b/ Importação da geometria no *software* IPS: após a importação das geometrias no *software* IPS, tem-se uma árvore de componentes (Figura 15);
- c/ Rearranjo da geometria na árvore de geometrias: nesta etapa a árvore deve ser organizada (Figura 16), de forma que separe componentes que serão fixos e móveis durante a análise de desmontagem / montagem, viabilizando assim os próximos passos da análise;

escrita em modo texto, é possível criar objetos (malhas poligonais) tridimensionais podendo definir cor, transparência, brilho, textura.

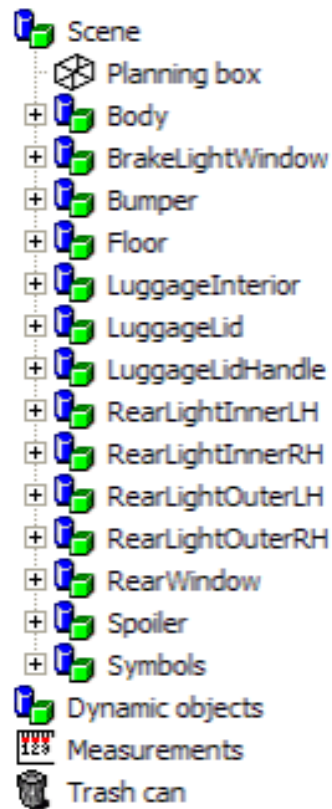


Figura 15 – IPS - Árvore de geometrias após a operação de importação.
 Fonte: IPS (2011)

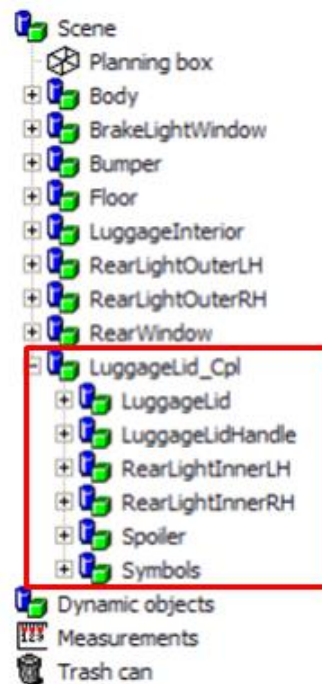


Figura 16 – IPS - Árvore de geometrias (após organização) para uma tampa de porta malas de um veículo de passeio
 Fonte: IPS (2011)

- d/ Definição da peça ou subconjunto que será desmontado / montado: nesta etapa, os respectivos componentes devem ser selecionados na árvore de geometrias e no *software* deve ser informado qual a geometria que terá sua rota planejada (Figura 17);

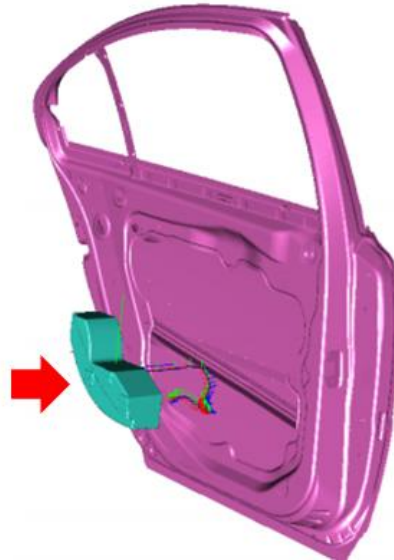


Figura 17 – IPS - Componente (porta objetos) que terá sua rota de desmontagem planejada.

Fonte: IPS (2011)

- e/ Definição da posição inicial e final da geometria analisada: nesta etapa, a geometria a ser analisada deverá ser posicionada no espaço tridimensional em uma localização que melhor represente sua posição após a remoção (Figura 18);

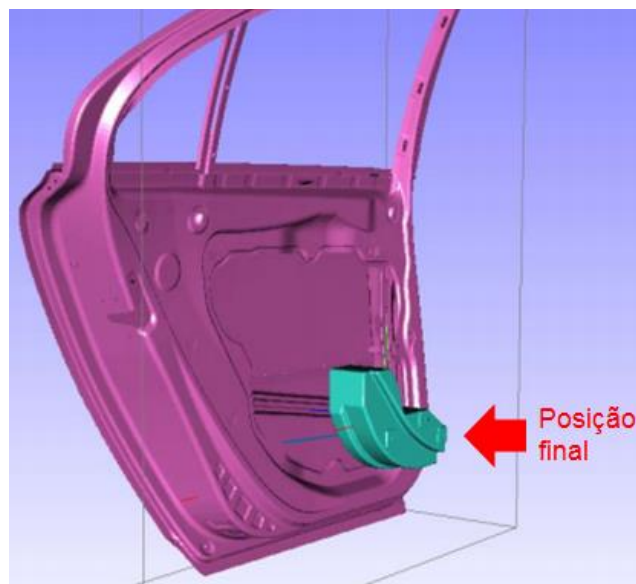


Figura 18 – IPS – Posição final (porta objetos) após sua desmontagem

Fonte: IPS (2011)

- f/ Executar a análise: após as entradas descritas acima, a análise de planejamento de rota propriamente dita deve ser executada. Após a finalização da análise, o *software* mostrará uma possível rota de desmontagem (Figura 19);

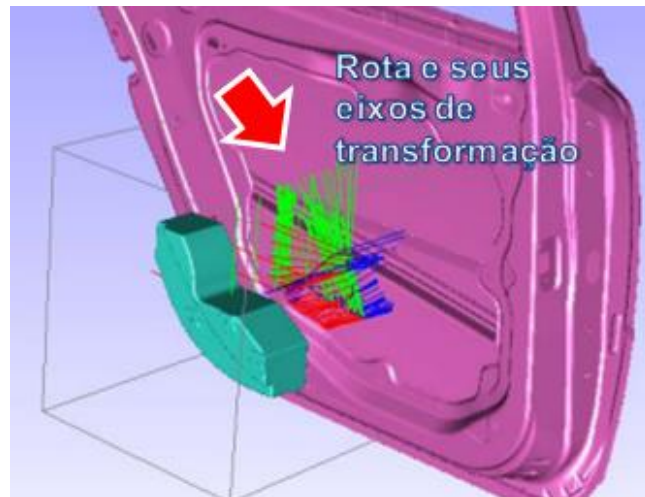


Figura 19 – IPS – Rota de desmontagem (porta objetos)
Fonte: IPS (2011)

- g/ Geração do volume de varredura: por fim, o volume de varredura tridimensional descrito pela geometria (porta objetos) durante a sua desmontagem deve ser criado pelo *software* (Figura 20).



Figura 20 – IPS – Volume de varredura descrito pela geometria (porta objetos) durante sua remoção
Fonte: IPS (2011)

Os passos descritos acima são os essenciais para a análise *path planning* e para este trabalho, sendo que o *software IPS – Path Planner* possui outras funcionalidades não abordadas neste trabalho.

2.5 UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO MULTICRITÉRIO *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS - AHP* COMO PROPOSTA DE SUPORTE À CLASIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE MANTENABILIDADE

Definir formas de medição e priorização de itens em diversas áreas incluindo o estudo de manutenibilidade é uma tarefa desafiante. Nem sempre os dados estão disponíveis, acessíveis ou estruturados na forma ideal para consolidação. Além disso, há também os aspectos subjetivos a serem considerados, cujas medições são ainda mais complexas, exatamente por serem de caráter pessoal e de difícil externalização.

Apesar da quantidade de diversas variáveis objetivas ou subjetivas possíveis Meyer; Ebrary (2003) afirma que simplificar a medição é a melhor solução. Os autores defendem que todas as medidas são imperfeitas e não é necessário medir mais, apenas encontrar uma forma que traduza o que realmente importa e conduza a um plano de ação eficiente.

A programação multicritério por meio do *AHP - Analytic Hierarchy Process* é uma técnica estruturada para tomada de decisão em ambientes complexos, em que um conjunto de variáveis predefinidas são consideradas para a priorização e seleção de alternativas ou projetos.

O AHP foi desenvolvido na década de 1970 por Thomas L. Saaty e foi extensivamente estudado a partir dessa época. Atualmente, é aplicado para a tomada de decisão em diversos cenários complexos, em que pessoas trabalham em conjunto para tomar decisões e onde percepções humanas, julgamentos e consequências possuem repercussão de longo prazo (BHUSHAN; RAI, 2004).

A utilização do AHP se inicia pela decomposição do problema em uma hierarquia de critérios mais facilmente analisáveis e comparáveis de modo independente (Figura 21). A partir do momento em que essa hierarquia lógica está construída, os tomadores de decisão avaliam sistematicamente as alternativas por

meio da comparação, duas a duas, dentro de cada um dos critérios. Essa comparação pode utilizar dados concretos das alternativas ou julgamentos humanos como forma de informação subjacente (SAATY, 2008).

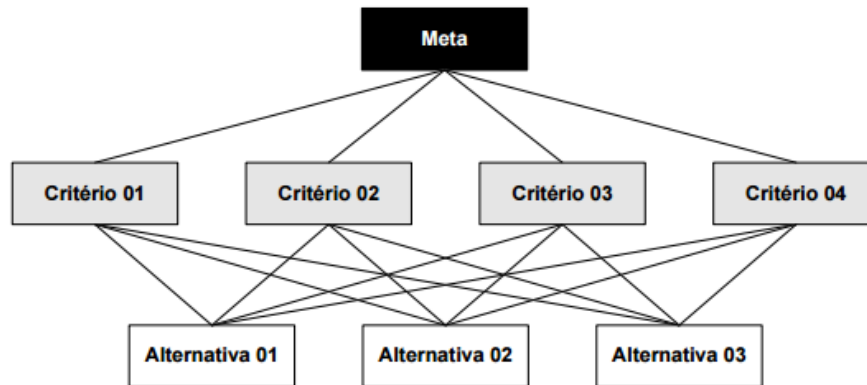


Figura 21 – Exemplo de hierarquia de critérios / objetivos
Fonte: Vargas (2010)

Para o autor, a teoria reflete o método natural de funcionamento da mente humana. Isto é, diante de um grande número de elementos (controláveis ou não), a mente os agrega em grupos segundo propriedades comuns. O cérebro repete esse processo e agrupa novamente os elementos em outro nível “mais elevado”, em função de propriedades comuns existentes nos grupos de nível imediatamente abaixo. A repetição dessa sistemática atinge o nível máximo quando este representa o objetivo do nosso processo decisório. E, assim, é formada a hierarquia, por níveis estratificados. O AHP transforma as comparações, muitas vezes empíricas, em valores numéricos que são processados e comparados. O peso de cada um dos fatores permite a avaliação de cada um dos elementos dentro da hierarquia definida. Essa capacidade de conversão de dados empíricos em modelos matemáticos é o principal diferencial do AHP com relação a outras técnicas comparativas.

A partir do momento em que todas as comparações foram efetuadas e os pesos relativos entre os critérios a serem avaliados foram estabelecidos, a probabilidade numérica de cada uma das alternativas é calculada. Essa probabilidade determina a probabilidade que a alternativa tem de atender a meta estabelecida. Quanto maior a probabilidade, mais aquela alternativa contribui para a meta final.

Os cálculos matemáticos envolvendo o AHP podem parecer simples em um primeiro momento. No entanto, em casos mais complexos, as análises e cálculos

tornam-se volumosos e exaustivos e, usualmente, só são viáveis através do uso de *softwares* específicos de cálculo.

2.5.1 O processo de hierarquização e aplicação do AHP e a escala de comparação - Escala Saaty

Conforme já apresentado, a metodologia do AHP constitui-se de decomposição por hierarquias e síntese pela identificação de relações através de escolha consciente. A prática da tomada de decisões está ligada à avaliação das alternativas, todas satisfazendo um conjunto de objetivos pretendidos. O problema está em escolher a alternativa que melhor satisfaz o conjunto total de objetivos. O intuito é obter pesos numéricos para alternativas com relação a sub objetivos e, para sub objetivos com relação a objetivos de ordem mais elevada (SAATY, 1991). O meio de estruturar logicamente os objetivos e sub objetivos do problema de decisão é pela hierarquia, como descrito anteriormente.

Grandzol (2005) descreve que, mediante comparações aos pares em cada nível da hierarquia baseadas na escala de prioridades do AHP, os participantes desenvolvem pesos relativos, chamados de prioridades, para diferenciar a importância dos critérios.

Para se fazer bom uso da escala de prioridades, entretanto, é preciso compreender o que são os julgamentos, no método criado por Saaty. Um julgamento ou comparação é a representação numérica de uma relação entre dois elementos que possuem o mesmo pai. O grupo de todos esses julgamentos pode ser representado numa matriz quadrada, na qual os elementos são comparados com eles mesmos. Cada julgamento representa a dominância de um elemento da coluna à esquerda sobre um elemento na linha do topo (SAATY, 1994).

A escala recomendada por Saaty (1991), mostrada na Tabela 3, vai de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre esses níveis 1 e 9. Além disso, desconsiderando as comparações entre os próprios critérios, que representam 1 na escala, apenas metade das comparações precisa ser feita, porque a outra metade constitui-se das comparações recíprocas na matriz de comparações.

Silva (2007) esclarece que o julgamento reflete as respostas de duas perguntas: qual dos dois elementos é mais importante com respeito a um critério de nível superior, e com que intensidade, usando a escala de 1-9, da Tabela 3. É importante notar que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o elemento linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, entra-se com o valor recíproco na posição correspondente da matriz. Devido à relação de reciprocidade e à necessidade de consistência entre duas atividades ou critérios, os recíprocos dos valores acima de zero são inseridos na matriz criada quando uma comparação entre duas atividades já foi realizada. O processo é robusto, porque diferenças sutis em uma hierarquia na prática não se tornam decisivas.

Tabela 3 – Escala de relativa importância de Saaty

Intensidade de importância	Recíproco	Definição	Explicação
1	1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	1/3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	1/5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	1/7	Importância muito grande ou demonstrada	Muito fortemente favorecida em relação à outra e sua dominação de é demonstrada na prática.
9	1/9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Usualmente, procura-se utilizar os números ímpares da tabela para assegurar razoável distinção entre os pontos da medição. O uso dos números pares

só deve ser adotado quando existir a necessidade de negociação entre os avaliadores e quando o consenso natural não for obtido, gerando a necessidade de determinação de um ponto médio como solução de compromisso (SAATY, 1980).

A seguir é apresentado o exemplo do preenchimento da matriz de julgamentos de acordo com o método AHP (Figura 22).

	A	B	C	D
A	1	5	6	7
B	1/5	1	4	6
C	1/6	1/4	1	4
D	1/7	1/6	1/4	1

Figura 22 – Exemplo de matriz comparativa

As posições da diagonal principal da matriz serão sempre 1. Afinal, um elemento é igualmente importante a ele mesmo. Para preencher os outros elementos da matriz fora da diagonal, os usuários fazem os julgamentos e determinam a intensidade de importância de acordo com a Tabela 3, que apresenta a escala de comparações empregadas no método. Para as comparações inversas, isto é, na parte inferior esquerda da matriz, colocam-se os valores recíprocos aos da parte superior direita da mesma.

No caso do exemplo da matriz comparativa (Figura 22), observa-se pela parte superior direita que todos os elementos-linha eram mais dominantes do que os elementos-coluna, pois todas as posições estão com números maiores que 1. Lê-se: A é cinco vezes mais dominante do que B e seis vezes mais dominante do que C.

A consistência da matriz deve ser garantida, a partir de uma quantidade básica de dados, todos os outros podem ser logicamente deduzidos. Se A é cinco vezes mais dominante do que B, e A é seis vezes mais dominante que C, então $A=5xB$ e $A=6xC$. Logo, $B/C = 6/5 =$ posição (B, C). Portanto, se o julgamento da posição (B, C) for diferente de 6/5, então a matriz é inconsistente, como ocorre na Matriz A.

Chan; Kwok; Duffy (2004) resume os passos recomendados para aplicação do AHP, que serão demonstrados e adaptados nas seções a seguir.

2.5.1.1 Definição do problema e o que se procura saber

Esta etapa consiste em expor as suposições refletidas na definição do problema, identificar as partes envolvidas, verificar como estas definem o problema e suas formas de participação no AHP.

Vargas (2010), visando exemplificar os cálculos de AHP, optou por desenvolver um modelo de decisão fictício para a organização ACME na priorização e na seleção de projetos em um portfólio. Primeiramente, realiza-se uma priorização dos fatores fundamentais que regem a escolha de um projeto dentro da empresa fictícia ACME. Após a obtenção dos pesos de cada fator, uma nova seleção é conduzida almejando-se classificar projetos futuros baseado nos pesos dos fatores fundamentais para priorização de projetos dentro do portfólio. Todas as priorizações foram realizadas com base no AHP.

2.5.1.2 Decomposição do problema desestruturado em hierarquias sistemáticas

O problema desestruturado pode ser organizado em hierarquias sistemáticas, do topo (objetivo geral) para o último nível (fatores mais específicos, usualmente as alternativas). Caminhando do topo para a extremidade, a estrutura do AHP contém objetivos, critérios (parâmetros de avaliação) e classificação de alternativas (medição da adequação da solução para o critério). Cada nó é dividido em níveis apropriados de detalhes. Quanto mais critérios, menos importante cada critério individual se torna, e a compensação ocorre pela atribuição de pesos para cada critério. É importante certificar-se de que os níveis estejam consistentes internamente e completos, e que as relações entre os níveis estejam claras.

No caso da organização fictícia ACME, foram estudados com a área financeira, a área de planejamento estratégico e a área de gerenciamento de projetos, os critérios-base a serem utilizados para a priorização de projetos dentro de um portfólio e, determinou-se um conjunto de doze critérios divididos em quatro grupos, conforme a hierarquia apresentada na Figura 23.



Figura 23 – Hierarquia de critérios da organização fictícia ACME
 Fonte: Vargas (2010)

2.5.1.3 Elaboração das matrizes de comparação

As matrizes de comparação paritária entre os elementos do nível superior e os do nível inferior devem ser construídas.

No caso da organização fictícia ACME, para o nível superior dos critérios de priorização de projetos tem-se os elementos destacados na Figura 24.



Figura 24 – Hierarquia de critérios de nível superior para priorização do portfólio de projetos ACME
 Fonte: Vargas (2010)

A matriz de comparação paritária para os elementos de nível superior na hierarquia de critérios de priorização de projetos em um portfólio na organização ACME pode ser observada na Figura 25. Para simplificar, a partir deste ponto a matriz será denominada como sendo matriz de critérios superiores ACME.

Na Figura 25 observa-se que a diagonal principal da matriz possui o valor 1, pois cada elemento da linha e coluna está sendo comparado com ele mesmo e, de acordo com a escala relativa de importância demonstrada na Tabela 3, isto significa que a comparação foi julgada como sendo de mesma importância. Vale ressaltar que a intensidade de importância 1, apresentada na escala relativa, não tem sua

utilização restrita única e exclusivamente à diagonal principal, podendo ser usada para classificação de membros distintos também.

	Comprometimento	Financeiros	Estratégicos	Outros Critérios
Comprometimento	1			
Financeiros		1		
Estratégicos			1	
Outros Critérios				1

Figura 25 – Matriz de critérios superiores ACME estabelecida
 Fonte: Vargas (2010)

2.5.1.4 Realização do julgamento dos elementos de uma matriz

Para completar a matriz são necessários $n(n - 1)/2$ julgamentos para uma matriz $n \times n$, sendo n o número de linhas e colunas (SILVA, 2007). Durante a análise é sempre julgado um elemento da linha versus um elemento da coluna participante, os valores inseridos são aqueles que refletem o julgamento da comparação entre os dois elementos de acordo com a escala apresentada na Tabela 3. Assim, prossegue-se o preenchimento da matriz.

Na Figura 26 pode-se observar a matriz de critérios superiores ACME preenchida. Sendo que esta é uma matriz 4×4 , foram necessários $4(4-1)/2 = 6$ (seis) julgamentos para o preenchimento da mesma.

Elementos julgados

	Comprometimento	Financeiros	Estratégicos	Outros Critérios
Comprometimento	1	1/5	1/9	1
Financeiros	5	1	1	5
Estratégicos	9	1	1	5
Outros Critérios	1	1/5	1/5	1

Inverso

Figura 26 – Matriz de critérios superiores ACME preenchida
 Fonte: Vargas (2010)

2.5.1.5 Cálculo do índice e da razão de consistência

Como regra geral, se a razão de consistência - RC for menor do que 0.1 (10%), então há consistência para prosseguir com os cálculos do AHP. Se for maior recomenda-se que os julgamentos sejam refeitos (por exemplo, revisitando-se os elementos da matriz e reavaliando-se as comparações paritárias) até que a razão de consistência aumente. A razão de consistência é obtida pela equação (5)

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (5)$$

Onde:

RC = Razão de consistência

IC = Índice de consistência

IR = Índice randômico

O índice de consistência pode ser calculado através da equação (6).

$$IC = \frac{\lambda_{M\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (6)$$

Onde:

IC = Índice de consistência

n = Número de critérios avaliados

$\lambda_{M\acute{a}x}$ = Auto valor máximo

E o índice randômico poder ser obtido através da Figura 27, onde o n significa o número de critérios envolvidos em uma matriz de comparação.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Figura 27 – Tabela de índices randômicos (IR)
Fonte: Saaty (2005)

Antes da obtenção da razão de consistência propriamente dita, é necessário se obter os dados de entrada para os cálculos (VARGAS, 2010). A primeira etapa é

normalizar cada uma das matrizes comparativas obtidas. A normalização se dá pela divisão de cada elemento da coluna pelo valor total da coluna. Para a matriz de critérios superiores ACME, obtém-se o resultado observado na Figura 28.

A determinação da contribuição de cada critério na meta organizacional ACME é calculada a partir do vetor de prioridade ou auto-vetor. O auto-vetor apresenta os pesos relativos entre os critérios e é obtido de modo aproximado³ através da média aritmética dos valores normalizados de cada um dos elementos de uma linha. O somatório dos valores do auto-vetor sempre totaliza 1 (um).

	Comprometimento	Financeiros	Estratégicos	Outros Critérios
Comprometimento	1	1/5	1/9	1
Financeiros	5	1	1	5
Estratégicos	9	1	1	5
Outros Critérios	1	1/5	1/5	1
Total (Soma)	16.00	2.40	2.31	12.00
Resultados				
Comprometimento	1/16=0.063	0.083	0.048	0.083
Financeiros	5/16=0.313	0.417	0.433	0.417
Estratégicos	9/16=0.563	0.417	0.433	0.417
Outros Critérios	1/16=0.063	0.083	0.087	0.083

Figura 28 – Normalização da matriz de critérios superiores ACME
Fonte: Vargas (2010)

Na Figura 29 pode-se ver o cálculo do auto-vetor para a matriz de critérios superiores ACME.

	Cálculo do auto vetor	Auto vetor
Comprometimento	$(0.063+0.083+0.048+0.083)/4 = 0.0693$	0.0693 (6.93%)
Financeiros	$(0.313+0.417+0.433+0.417)/4 = 0.3946$	0.3946 (39.46%)
Estratégicos	$(0.563+0.417+0.433+0.417)/4 = 0.4571$	0.4571 (45.71%)
Outros Critérios	$(0.063+0.083+0.087+0.083)/4 = 0.0789$	0.0789 (7.89%)

Figura 29 – Cálculo do auto-vetor para a matriz de critérios superiores ACME
Fonte: Vargas (2010)

O último valor a ser obtido é o auto-valor máximo. Ele é calculado através do somatório do produto de cada elemento do auto-vetor pelo valor total da somatória

³ O auto-vetor também é citado na literatura como sendo o vetor de Eigen. O cálculo exato do auto-vetor é determinado apenas em casos específicos. A maioria dos casos práticos utiliza essa aproximação visando simplificar o processo de cálculo, uma vez que a diferença entre o valor real e o valor aproximado é inferior a 10% (KOSTLAN, 1991).

da respectiva coluna da matriz de comparação. Este cálculo está exemplificado na Figura 30.

Auto vetor	0.0693	0.3946	0.4571	0.0789
Total (Soma)	16.00	2.40	2.31	12.00
Auto valor máximo ($\lambda_{Máx}$)	[(0.0693x16.00)+(0.3946x2.40)+(0.4571x2.31)+(0.0789x12.00)] = 4.06			

Figura 30 – Cálculo do auto-valor máximo para a matriz de critérios superiores ACME
Fonte: Vargas (2010)

Após a obtenção de todos os valores de entrada, o índice de consistência pode ser calculado através da aplicação da equação (6). Para a matriz de critérios superiores ACME o cálculo do índice de consistência está mostrado na equação (7).

$$IC = \frac{4.06-4}{4-1} = 0.020 \quad (7)$$

Visando verificar se o valor encontrado para o índice de consistência é adequado, Saaty (SAATY, 2005) propôs o que foi chamado de razão de consistência, conforme já demonstrado na equação (5). Calculando-se a razão de consistência para a matriz de critérios superiores ACME obtém-se o valor demonstrado na equação (8)

$$RC = \frac{0.020}{0.90} = 0.022 \quad (8)$$

Como o valor obtido para a razão de consistência é menor que 0.1 (10%), a matriz de comparação pode ser considerada consistente. Com isso, os resultados de critérios de prioridade para o primeiro nível podem ser observados na Figura 31.

Os valores encontrados para o auto-vetor tem significado direto no AHP. Ele determina a participação ou o peso daquele critério no resultado total. Por exemplo, no caso da organização ACME, os critérios “estratégicos” têm um peso de 45.71% na seleção de um determinado projeto dentro do portfólio. Uma avaliação positiva nesse fator contribui aproximadamente sete vezes mais do que uma avaliação positiva no critério “comprometimento” que obteve um peso de 6,93%.

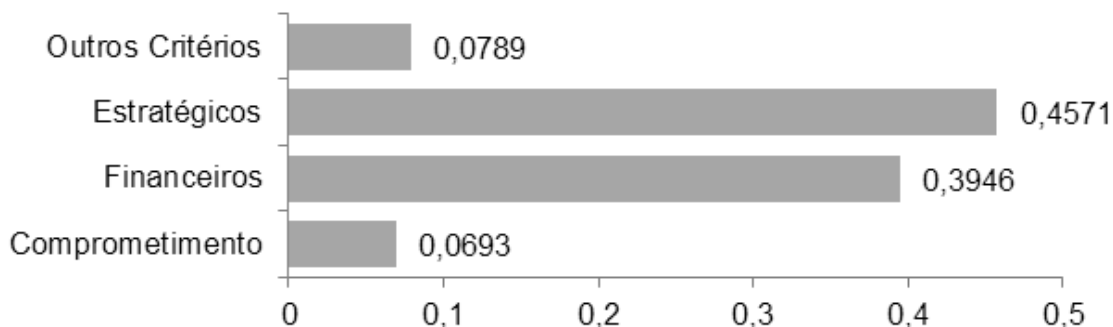


Figura 31 – Contribuição de cada critério do nível superior ACME
 Fonte: Vargas (2010)

Conforme já demonstrado anteriormente na Figura 23, a meta de seleção de projetos da organização ACME é composta por uma hierarquia onde se tem elementos pertencentes ao nível superior e inferior. Portanto, torna-se necessário avaliar os pesos relativos dos critérios do nível inferior da hierarquia, demonstrados na Figura 32. Esse processo é realizado de modo idêntico aos passos apresentados anteriormente para o nível superior hierarquia.



Figura 32 – Hierarquia de critérios da organização fictícia ACME com ênfase nos níveis inferiores
 Fonte: Vargas (2010)

Na Figura 33 estão as matrizes de critérios inferiores para a organização fictícia ACME.

Comprometimento das Partes Interessadas	Comp.do time	Comp. da organização	Comp. do gerente de projeto	Critérios financeiros	Retorno de investimento	Lucro (US\$)	Valor presente líquido
Comprometimento do time	1	3	1/5	Retorno de investimento	1	1/5	1/5
Comprometimento da organização	1/3	1	1/9	Lucro (US\$)	5	1	1
Comp. do gerente de projeto	5	9	1	Valor presente líquido	5	1	1

Critérios estratégicos	Competir mercados internacionais	Processos internos	Reputação	Outros critérios	Reduz risco para a organização	Urgência	Conhecimento técnico interno
Competir mercados internacionais	1	7	3	Reduz risco para a organização	1	5	1/3
Processos internos	1/7	1	1/5	Urgência	1/5	1	1/7
Reputação	1/3	5	1	Conhecimento técnico interno	3	7	1

Figura 33 – Matriz de critérios inferiores ACME
 Fonte: Vargas (2010)

A Figura 34 mostra os resultados de prioridade para os critérios inferiores ACME.

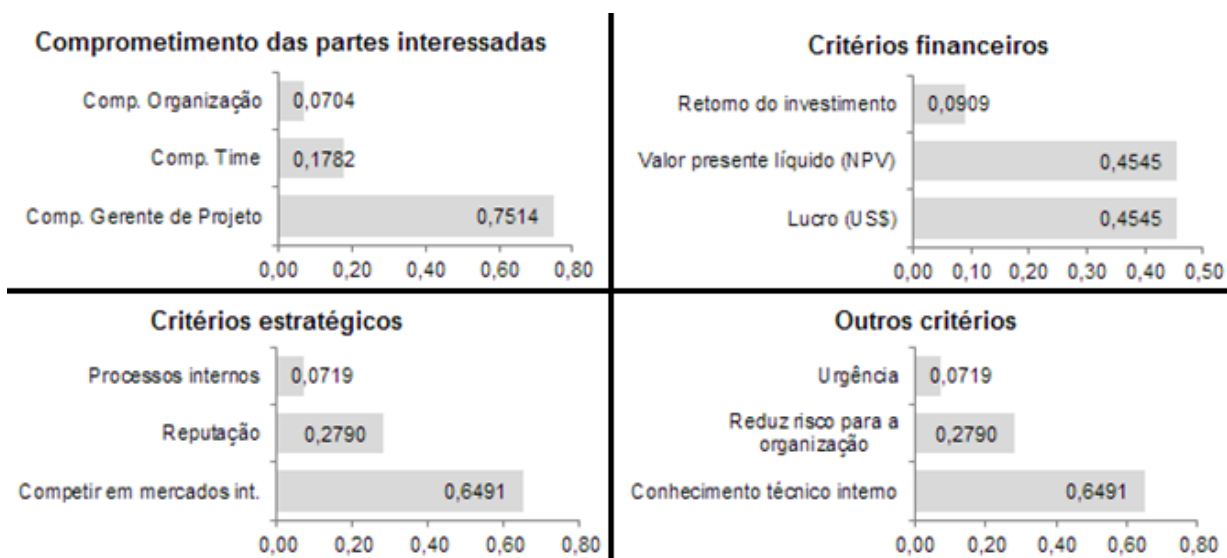


Figura 34 – Prioridade para os critérios inferiores ACME
 Fonte: Vargas (2010)

2.5.1.6 Estabelecimento das prioridades locais e globais

Saaty (1994) mostra que há dois meios de sintetizar as prioridades locais das alternativas, usando prioridades globais dos critérios pai: i/ o modo distributivo; ii/ o modo ideal. No distributivo, os pesos das alternativas somam 1 (um). É adotado quando há dependência entre as alternativas e uma prioridade unitária é distribuída

entre elas, ou seja, quando o objetivo é escolher uma alternativa que é melhor em relação a outras.

Grandzol (2005) exemplifica que o modo distributivo é apropriado para alocação proporcional de um benefício. Traduzindo numericamente o exemplo do autor, três alternativas com relação de dependência A, B e C teriam prioridades como $A=0.2$, $B=0.5$ e $C=0.3$, que totalizam 1.0.

Já o modo ideal, é utilizado para obter a melhor alternativa entre alternativas distintas e sem relação de dependência. Nesse modo, as prioridades locais das alternativas são divididas pelo maior valor entre elas. Isso ocorre para cada critério, e a alternativa torna-se ideal de valor 1. Se as alternativas são suficientemente distintas, sem dependência nas definições, o modo ideal seria o meio de síntese. No exemplo citado de: A, B e C; B seria a alternativa ideal com prioridade 1.0 ($= 0.5 \div 0.5$), C teria prioridade 0.6 ($= 0.3 \div 0.5$) e A teria prioridade 0.4 ($= 0.2 \div 0.5$).

Para este estudo o modo distributivo é o modo adotado.

A prioridade global de cada um dos critérios é determinada através da multiplicação de cada prioridade do primeiro nível por sua respectiva no segundo nível. Os resultados para os critérios da organização ACME são apresentados na hierarquia da Figura 35. Observa-se, também, que a soma dos pesos dos 12 fatores totaliza 1.

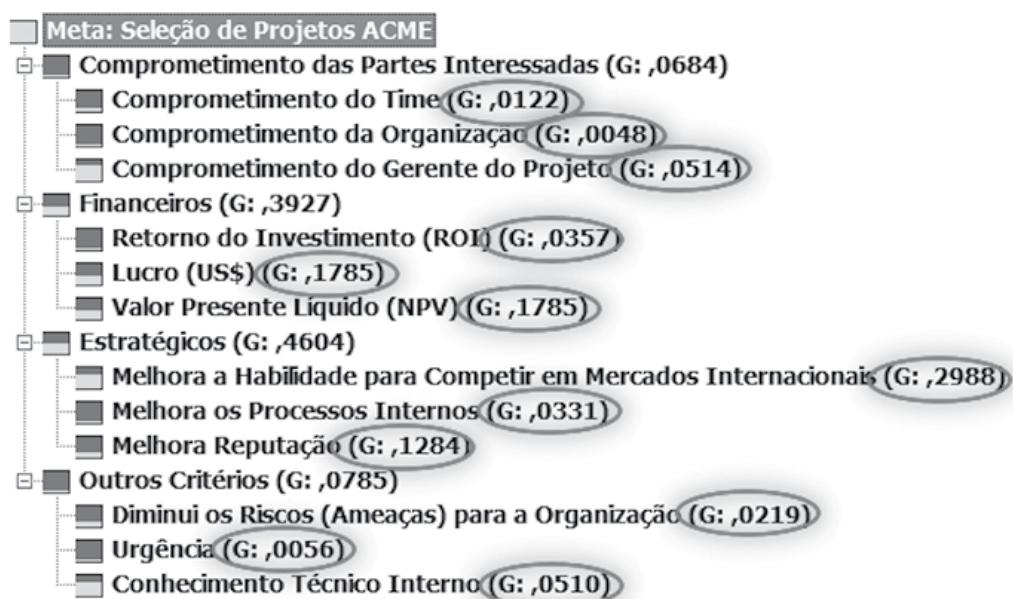


Figura 35 – Hierarquia de critérios da organização fictícia ACME com as prioridades globais de cada um dos critérios

Fonte: Vargas (2010)

2.5.1.7 Classificação dos fatores baseado nas prioridades locais e globais

Tomando-se novamente a Figura 21 como base, pode-se observar que, até o momento, as prioridades e pesos dos critérios para o atingimento da meta foram estabelecidos, faltando agora determinar como cada uma das alternativas comporta-se em relação aos critérios estabelecidos, contribuindo assim também para a meta.

Da mesma forma que foi realizada a priorização dos critérios, as alternativas são confrontadas, duas a duas para cada um dos critérios estabelecidos.

No caso apresentado da organização ACME, as alternativas são representadas pelos projetos que necessitam ser priorizados dentro de um portfólio. Esses projetos serão confrontados com os fatores que regem a priorização de projetos previamente calculados e demonstrados na Figura 35. Para isso, foram identificados seis projetos dentro da organização fictícia ACME:

- a/ Mudança para um novo escritório;
- b/ Novo Sistema ERP;
- c/ Abertura do Escritório na China;
- d/ Desenvolvimento de Novo Produto para Mercado Internacional;
- e/ Terceirização da Infraestrutura de TI;
- f/ Nova Campanha de Marketing Local.

Para aplicar o AHP, os seis projetos foram comparados em cada um dos doze critérios definidos. O passo a passo para obtenção dos valores foram os mesmos utilizados para os critérios. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 4.

Pela Figura 36, o projeto com maior aderência as metas definidas é o desenvolvimento de um produto internacional. Ele contribui em 35,2% (0,352) da meta. Para ilustrar a importância da diferença entre os pesos e prioridades de cada projeto, o projeto do novo produto internacional contribui cerca de três vezes mais para a meta do que o projeto relacionado à campanha de marketing local, que, por sua vez, contribui apenas em 12,8% (0,128) para a meta global.

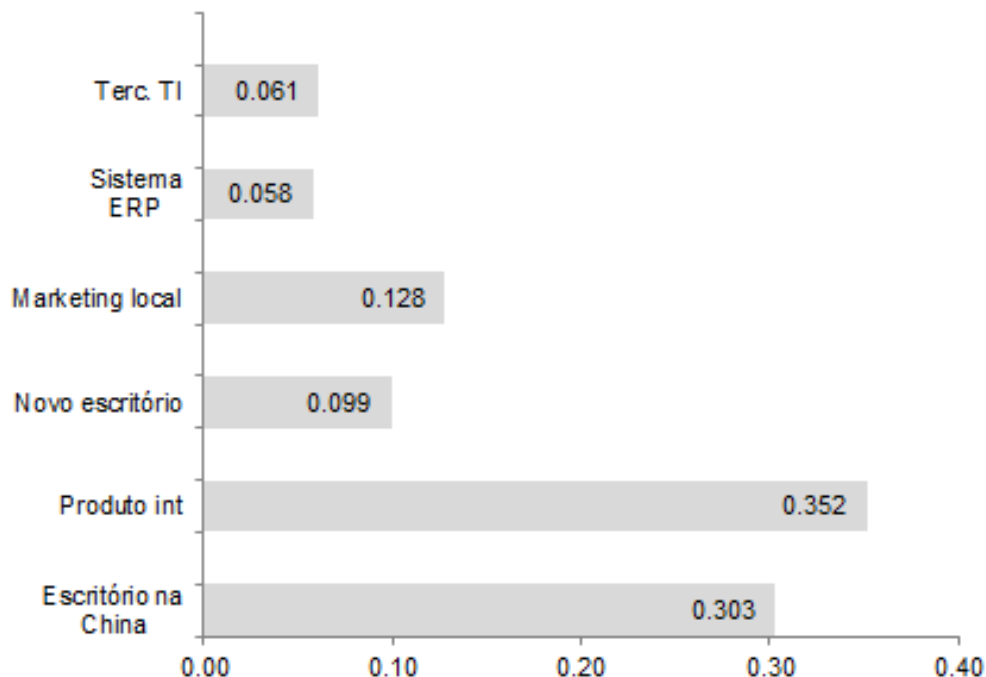


Figura 36 – Resultado final para as prioridades do portfólio de projetos da organização fictícia ACME

Fonte: Adaptado de Vargas (2010)

O AHP tem atraído o interesse de muitos pesquisadores, principalmente devido às propriedades matemáticas do método e ao fato de que a entrada de dados é sensivelmente simples de ser obtida (TRIANANTAPHYLLOU; MANN, 1995). Sua simplicidade é caracterizada pela comparação, par a par, das alternativas segundo critérios específicos (VARGAS, 1990).

Sua aplicação permite que os tomadores de decisão tenham uma ferramenta específica e matemática de apoio à decisão. Essa ferramenta suporta e qualifica as decisões, além de permitir que os tomadores de decisão justifiquem suas escolhas e simulem os resultados. Embasado por estes fatores o AHP torna-se aplicável na classificação de critérios no estudo de manutenibilidade também.

O uso do AHP também pressupõe a utilização de *software* específico para os cálculos matemáticos. Nesta seção, buscou-se mostrar os principais cálculos realizados durante a análise, visando o entendimento adequado da técnica, como também a complexidade do volume de cálculo a ser realizado manualmente (caso *softwares* específicos não sejam utilizados).

Tabela 4 – Valores utilizados para definição das prioridades do portfólio de projetos ACME

	Peso do Critério	Escritório na China		Produto int		Novo escritório		Marketing local		Sistema ERP		Terc. TI	
		Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.
Comp. do Time	0.012	0.161	0.002	0.396	0.005	0.297	0.004	0.072	0.001	0.038	0.000	0.036	0.000
Comp. da Organização	0.005	0.488	0.002	0.288	0.001	0.099	0.000	0.061	0.000	0.033	0.000	0.032	0.000
Comp. Gerente de Projetos	0.051	0.344	0.018	0.355	0.018	0.159	0.008	0.073	0.004	0.040	0.002	0.029	0.001
Retorno de Investimento	0.036	0.307	0.011	0.456	0.016	0.030	0.001	0.101	0.004	0.042	0.001	0.065	0.002
Lucro (US\$)	0.179	0.292	0.052	0.469	0.084	0.032	0.006	0.109	0.019	0.031	0.005	0.069	0.012
Valor Presente Líquido	0.179	0.245	0.044	0.474	0.085	0.037	0.007	0.118	0.021	0.061	0.011	0.065	0.012
Competir em Mercados Int.	0.299	0.408	0.122	0.377	0.113	0.103	0.031	0.024	0.007	0.037	0.011	0.051	0.015
Processos internos	0.033	0.046	0.002	0.036	0.001	0.190	0.006	0.051	0.002	0.398	0.013	0.279	0.009
Reputação	0.128	0.352	0.045	0.174	0.022	0.042	0.005	0.339	0.044	0.068	0.009	0.025	0.003
Reduz o risco para a org.	0.022	0.028	0.001	0.089	0.002	0.299	0.007	0.423	0.009	0.117	0.003	0.044	0.001
Urgência	0.006	0.288	0.002	0.477	0.003	0.055	0.000	0.053	0.000	0.092	0.001	0.034	0.000
Conhecimento técnico interno	0.051	0.061	0.003	0.037	0.002	0.480	0.024	0.331	0.017	0.024	0.001	0.068	0.003
Resultados		0.303		0.352		0.099		0.128		0.058		0.061	

Fonte: Adaptado de Vargas (2010)

2.6 CARACTERIZAÇÃO DE OPORTUNIDADES

A partir desta pesquisa bibliográfica, foi possível identificar uma série de conteúdos disponíveis atualmente. Porém, um tanto quanto desconectos no que tange o suporte ao engenheiro de serviço e demais membros do time de projeto, na seleção de conceitos baseado em diretrizes de manutenibilidade.

Algumas considerações podem ser observadas:

a/ O planejamento de rotas é minimamente utilizado hoje para o estudo de manutenibilidade;

b/ Apesar do planejamento de rotas apresentar benefícios, o seu uso isolado não garante o endereçamento de regras de manutenibilidade, tornando o julgamento dos resultados muitos subjetivos;

c/ A ferramenta AHP se aplicada ao estudo de manutenibilidade, pode fechar algumas lacunas, definindo formas de medição e priorização de regras de manutenibilidade.

Baseado nas considerações apresentadas acima, um método é proposto no capítulo 3.

3 MÉTODO PARA CLASSIFICAÇÃO DE CONCEPÇÕES DE PRODUTO CONSIDERANDO DIRETRIZES DE MANTENABILIDADE

Este capítulo visa abordar o processo adotado para o desenvolvimento da análise classificatória de concepções de produto considerando: i/ diretrizes de manutenibilidade no projeto conceitual; ii/ os critérios utilizados; e iii/ as ponderações estabelecidas para o funcionamento da mesma.

A estruturação partiu de uma constatação baseado na realidade (dificuldade de avaliação das alternativas no projeto conceitual sob o ponto de vista de manutenibilidade). Foi então, estabelecido o modo como o método seria desenvolvido (a partir da definição e pontuação dos critérios e subcritérios). Isto posto, a ferramenta resultante deste processo deveu atender ao objetivo proposto pelo método (classificar, por meio do percentual obtido, o quão os conceitos submetidos ao método estão alinhados às diretrizes de manutenibilidade).

3.1 PRESSUPOSTOS DO MÉTODO

A geração de alternativas conceituais de produto consiste numa etapa dinâmica dentro do processo de desenvolvimento de produtos. Existem muitas formas de materializar as ideias concebidas na geração de conceitos. As ideias podem ser apresentadas na forma de um desenho de apresentação, ou ainda, a solução preliminar pode ser concebida através da abstração dos principais problemas, da formação de estruturas funcionais, da procura de princípios de solução adequados e sua combinação. Do mesmo modo, a concepção selecionada é uma descrição aproximada das tecnologias, princípios de funcionamento e proposta formal do produto em questão. Pode ser expressa por meio de um esquema ou modelo tridimensional que possa fornecer subsídios para o entendimento da proposta selecionada.

Do mesmo modo, é importante que a equipe de projeto esteja ciente do momento na etapa conceitual em que a análise classificatória será aplicada. Será no momento de selecionar ou desenvolver uma alternativa considerando diretrizes de manutenibilidade, durante o projeto conceitual, que o método proposto deverá ser aplicado, conforme ilustra a Figura 37.

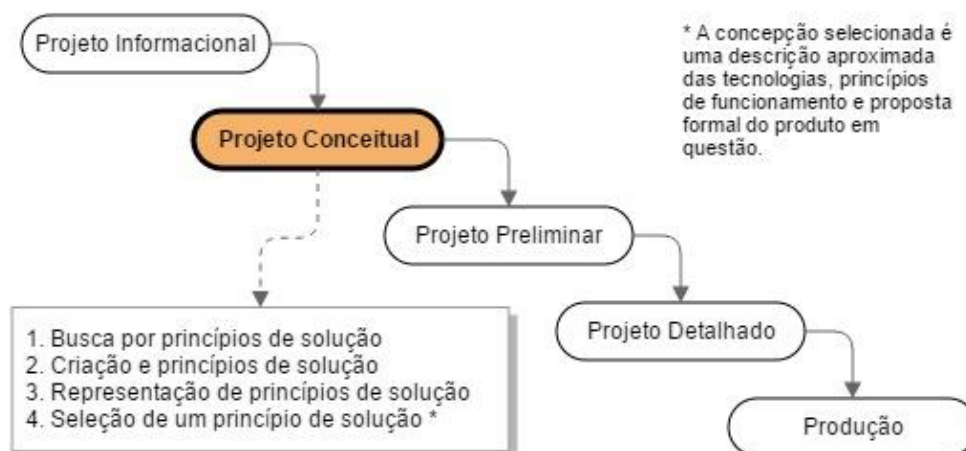


Figura 37 – Ocasião de uso do método

Deste modo, buscou-se identificar a configuração mais apropriada para que as alternativas pudessem passar por um processo de avaliação. Ou seja, para que a análise classificatória possa ser aplicada, as alternativas devem obedecer algumas premissas que são:

- a/ O produto deve ser enquadrado como um item passível de manutenção;
- b/ São necessárias duas ou mais propostas de solução para comparação;
- c/ Caso o produto seja um subconjunto, as interfaces onde ocorrerá a instalação deste subconjunto devem estar disponíveis;
- d/ O meio necessário para apresentação das alternativas de conceito é através de um modelo tridimensional. Ou seja, em ambiente CAD 3D. O nível de detalhamento deste modelo tridimensional não necessita estar completamente concluído, pois se está trabalhando em uma fase de projeto conceitual. Entretanto, alguns detalhes como o volume tridimensional ocupado pelo produto, tipo de fixações propostas, são itens que devem estar presentes antes da análise, uma vez que visa transmitir as ideias principais, sem ater-se a detalhes minuciosos (e.g.: detalhamento de todos os componentes internos, detalhamento de todos os elementos de fixação como parafusos, porcas e arruelas, entre outros). O grupo de alternativas submetidas à análise poderá, ainda, ser derivado de uma composição de

alternativas já desenvolvidas (e disponíveis no mercado) e conceitos, visando, desta maneira, obter uma comparação entre um produto atual e uma nova proposta futura;

- e/ Produtos que são compostos por materiais considerados deformáveis (e.g.: que possuem sua forma geométrica alterada em alguma etapa do processo de desmontagem ou montagem), não podem ser incluídos nesta análise. Como exemplo tem-se mangueiras, espumas, entre outros. Exceção pode ocorrer, caso o produto possa ser considerado como rígido durante toda a sua rota de desmontagem. Neste caso, um modelo tridimensional na sua posição rígida deve ser fornecido.

3.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Nas próximas seções, encontra-se a descrição da proposta para conduzir a classificação de concepções de produto, sob o ponto de vista de manutenibilidade, baseada em vetores de manutenibilidade. O esquema contido na Figura 38 ilustra o desdobramento das atividades envolvidas no processo.

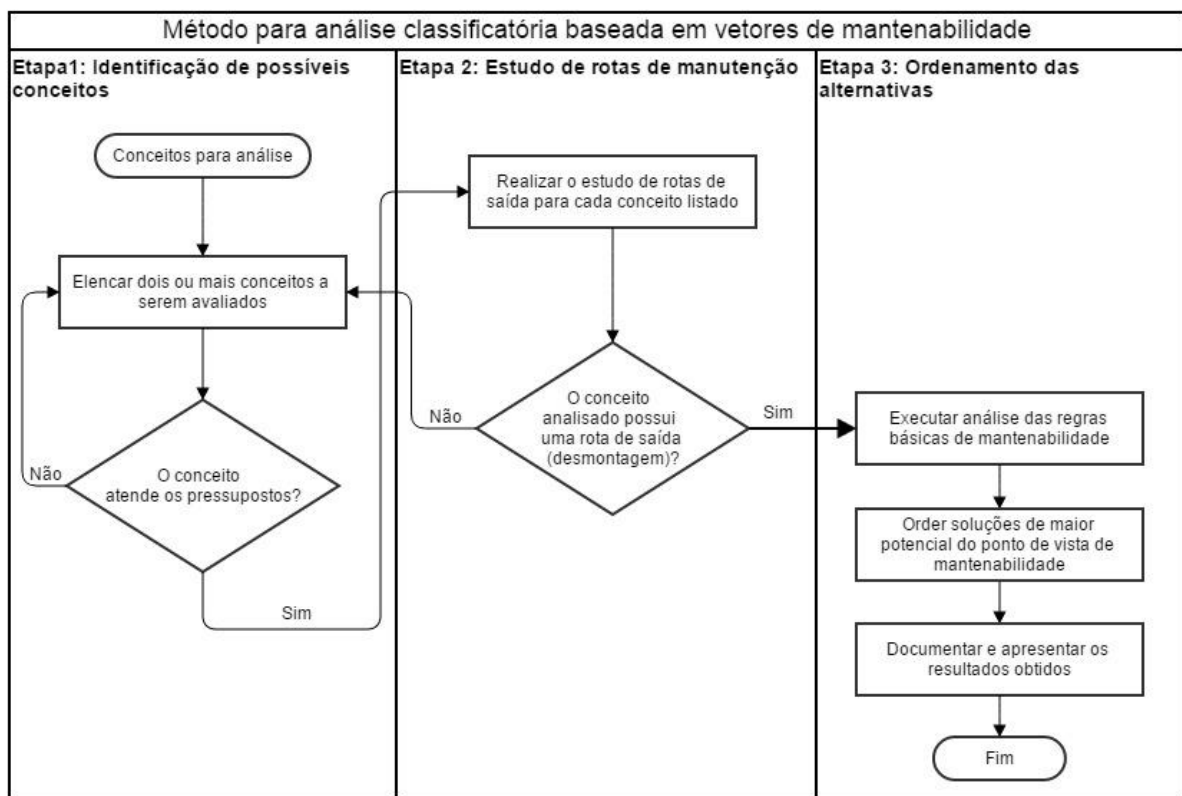


Figura 38 – Esquema representativo do método para análise classificatória baseada em vetores de manutenibilidade

Para auxiliar no entendimento do método proposto, um contexto de produto (e suas concepções alternativas, na etapa de projeto) foi empregado para caracterizar cada procedimento e decisão.

O produto escolhido foi um tanque de armazenamento de ar, a ser instalado em um veículo de aplicação pesada. Um exemplo “tipo” pode ser encontrado na Figura 39.



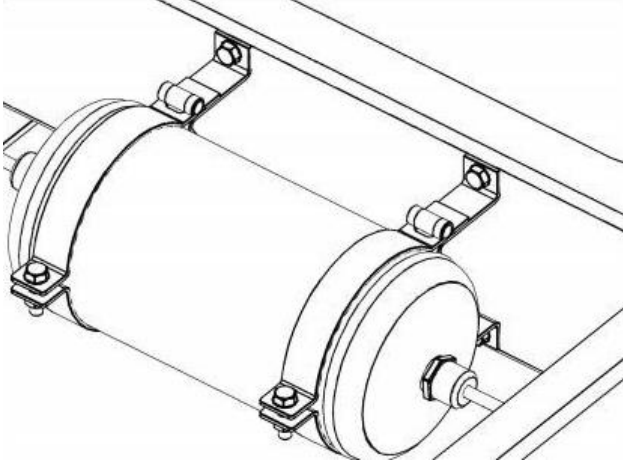
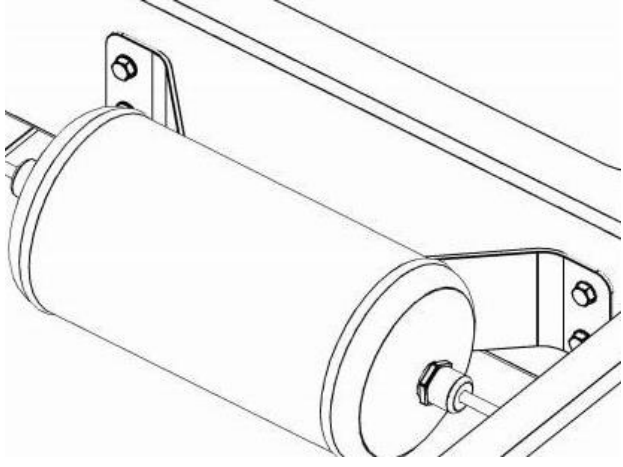
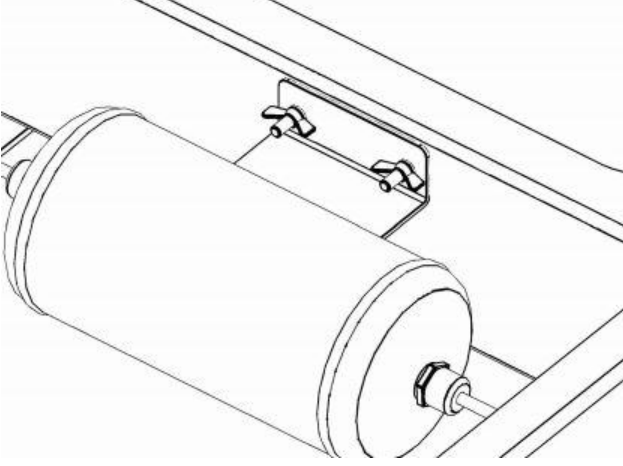
Figura 39 – Exemplo de tanques de ar utilizados em veículos de aplicação pesada

3.2.1 Etapa 1: Identificação de possíveis conceitos

A partir da identificação da oportunidade e da definição das características que o produto deverá ter, a equipe de projeto desenvolve as concepções. A verificação da aderência das concepções aos pressupostos listados na seção 3.1 deve ser então conduzida. O layout das soluções propostas e características relevantes podem ser encontrados no Quadro 1.

Observa-se que as três alternativas atenderam às premissas elencadas. Portanto, podem prosseguir à próxima etapa do processo de classificação.

Quadro 1 - Descrição e parâmetros das alternativas apresentadas

	Alternativas	Características
Alternativa 01		<ul style="list-style-type: none"> - É um item passível de manutenção; - Possui interface onde o produto será aplicado; - Existem informações tridimensionais mínimas necessárias para a análise; - Forma de fixação através cintas; - Conexões pneumáticas tipo engate rápido.
Alternativa 02		<ul style="list-style-type: none"> - É um item passível de manutenção; - Possui interface onde o produto será aplicado; - Existem informações tridimensionais mínimas necessárias para a análise; - Forma de fixação através de parafusos; - Conexões pneumáticas tipo engate rápido.
Alternativa 03		<ul style="list-style-type: none"> - É um item passível de manutenção; - Possui interface onde o produto será aplicado; - Existem informações tridimensionais mínimas necessárias para a análise; - Forma de fixação através de parafusos borboleta; - Conexões pneumáticas tipo engate rápido.

3.2.2 Etapa 2: Estudo de rotas de manutenção

A definição de potenciais rotas possíveis de manutenção é realizada com o auxílio da ferramenta de planejamento de rotas (*path planning*), conforme abordado na seção 2.4.1.1. Os passos desta etapa são:

- a/ Exportação da geometria: as geometrias em 3D que representam as alternativas 01, 02 e 03 foram exportadas em arquivo com extensão VRML;
- b/ Importação da geometria: as geometrias em 3D que representam as alternativas 01, 02 e 03 foram importadas para o *software* IPS, conforme Figura 40. Vale ressaltar que, nesta etapa, todos os componentes que devem ser previamente desmontados para a remoção do tanque já foram removidos e não devem permanecer no conjunto;

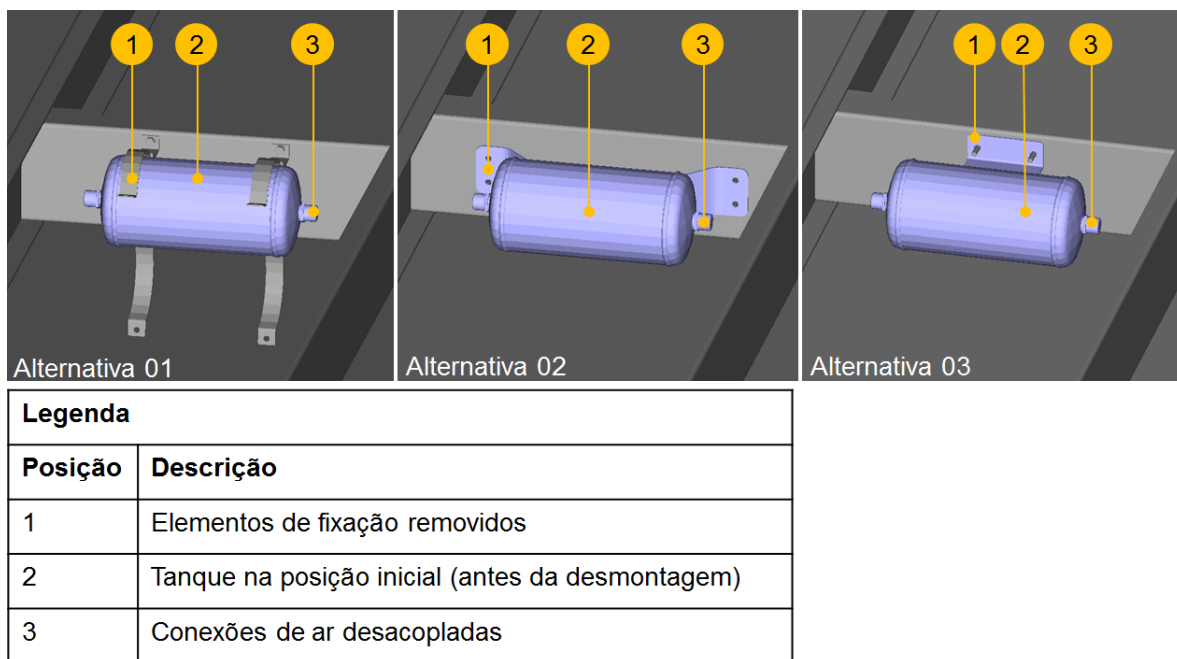


Figura 40 – Alternativas importadas no *software* IPS

- c/ Rearranjo da geometria na árvore de geometrias: nesta etapa, os componentes fixos e móveis, durante a simulação foram separados em grupos independentes. A Figura 41 mostra a reorganização final da árvore para as três alternativas analisadas;

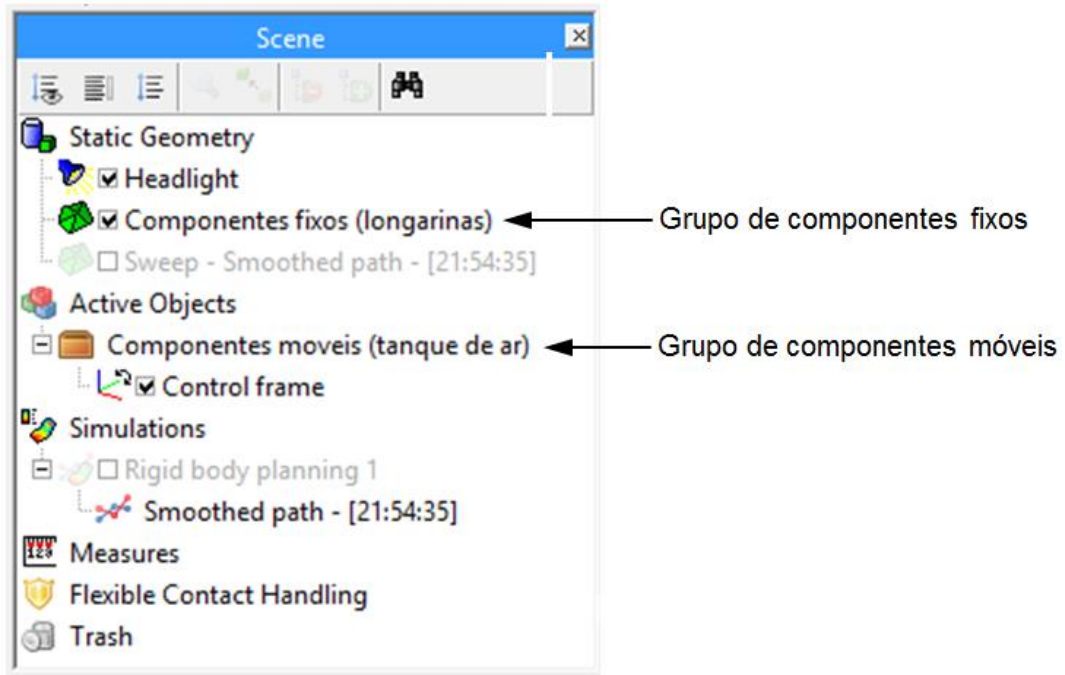


Figura 41 – Organização da árvore dentro do *software* IPS para as três alternativas analisadas

d/ Definição da peça ou subconjunto que será desmontado / montado: nesta etapa, os componentes a serem desmontados foram informados ao *software* conforme Figura 42;

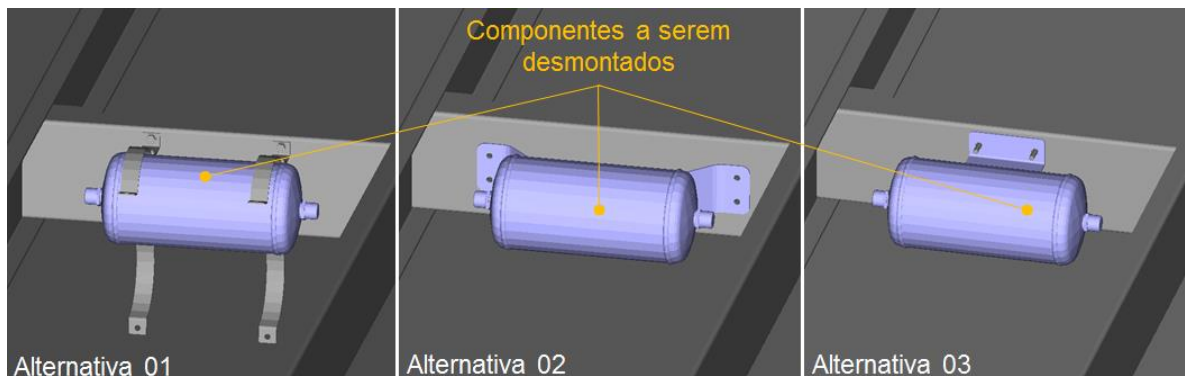


Figura 42 – Componentes a serem desmontados dentro do *software* IPS para as três alternativas analisadas

e/ Definição da posição inicial e final da geometria analisada: nesta etapa, a geometria a ser analisada (tanque de ar) foi posicionada no espaço tridimensional em uma localização que melhor representa sua posição após a remoção (Figura 43);

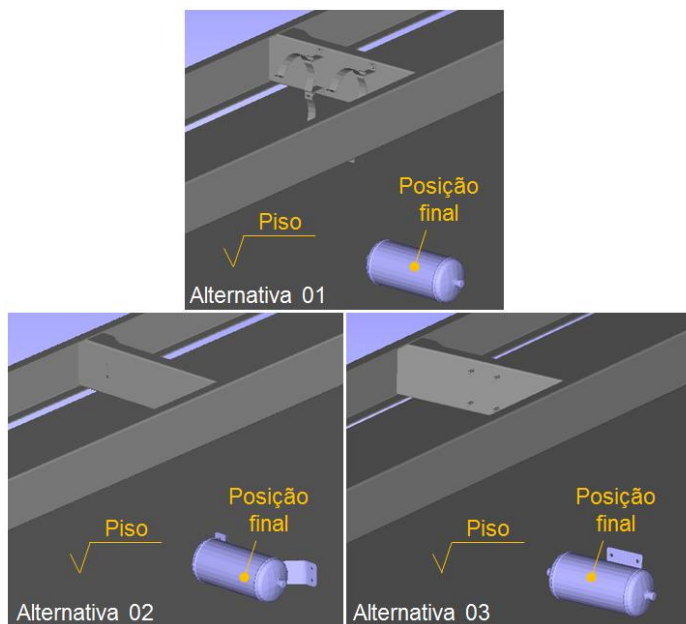


Figura 43 – Posição final das três alternativas após a desmontagem

- f/ Execução da análise: após as entradas descritas acima, a análise de planejamento de rota propriamente dita foi executada. Após a finalização da análise, o *software* mostrou uma possível rota de desmontagem representada por eixos de transformação no espaço (Figura 44);

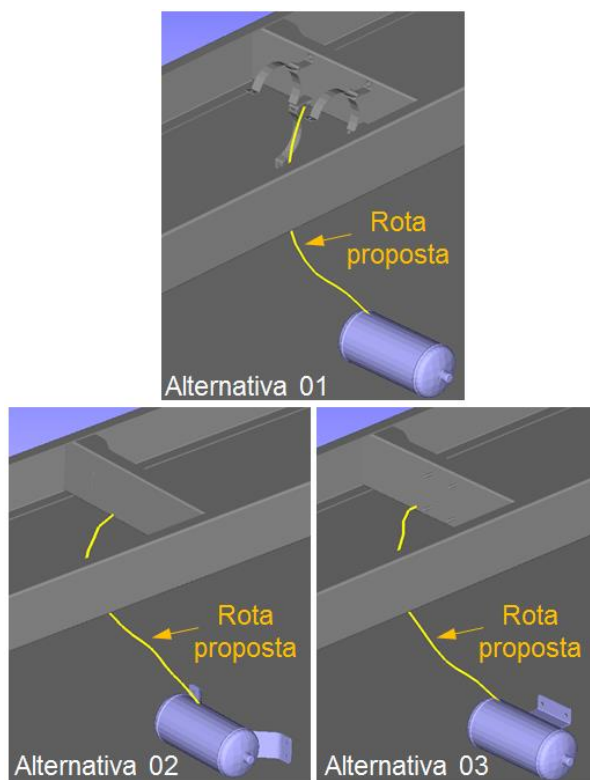


Figura 44 – Rota de desmontagem proposta pelo *software* para as três alternativas

- g/ Geração do volume de varredura: por fim, o volume de varredura tridimensional descrito pela geometria (tanque de ar) durante a sua desmontagem foi criado pelo *software* (Figura 45).

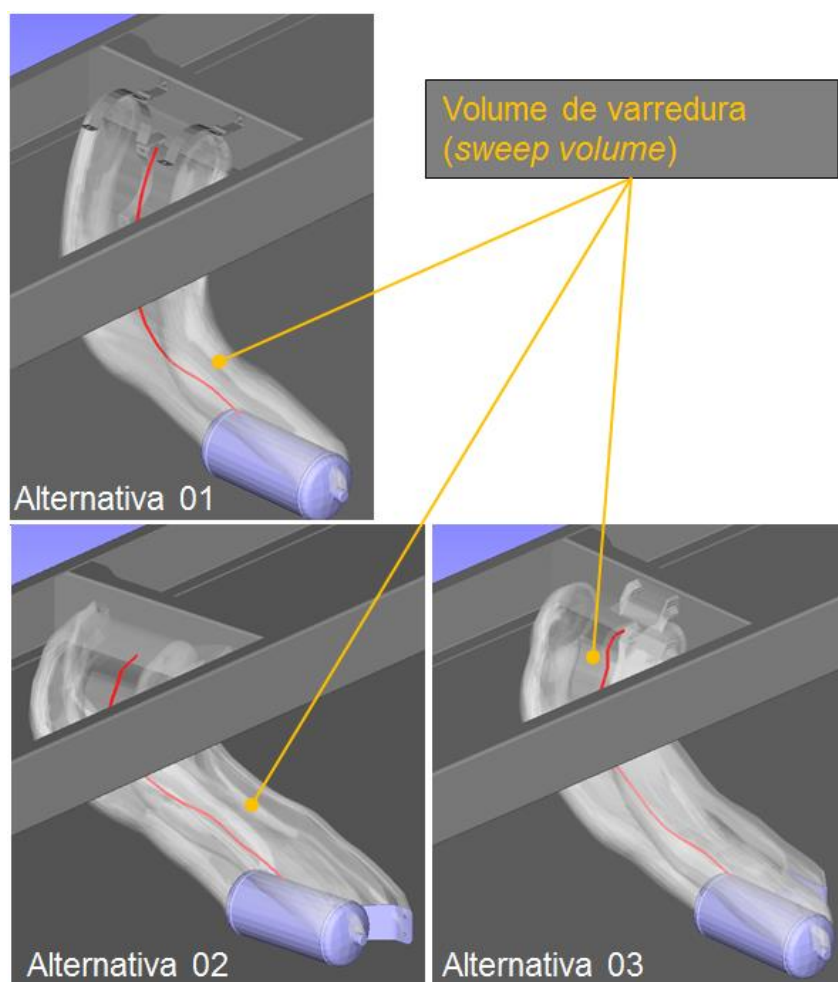


Figura 45 – Volume de varredura descrito pelo tanque de ar

A partir do momento em que as soluções propostas apresentam uma possível rota de desmontagem livre de colisão, esta etapa está concluída. Há então o armazenamento dos volumes de varredura visando, desta maneira, a reserva do espaço de manutenção para estes componentes, não somente em sua posição montada, mas sim considerando todo seu percurso. Caso alguma das soluções não apresente uma possível rota de desmontagem sem que haja colisão, mesmo com a remoção de componentes circundantes e que não estão ligados diretamente à operação, ou componente a ser reparado, a solução é considerada como inválida do ponto de vista de manutenabilidade. Vale lembrar que a remoção de itens não ligados

diretamente ao sistema que está sofrendo manutenção é uma prática não recomendada sob os aspectos de manutenibilidade, apesar de ser possível. A abordagem proposta contém funcionalidades que capturam e penalizam estas situações em que desmontagens complementares são necessárias.

No exemplo utilizado as três alternativas possuíram rotas de saída e/ou desmontagem muito semelhantes. Portanto, pode-se dizer que o tempo aproximado de desmontagem foi praticamente igual. Entende-se que o tempo é dependente de uma série de fatores, podendo, até mesmo, variar de executor para executor, no contexto de uma solução durante a atividade de manutenção.

3.2.3 Etapa 3: Ordenamento das alternativas

Para implementação desta etapa, as alternativas consideradas aptas a participar deste processo, identificadas na seção 3.2.2, são empregadas.

Para caracterização da ordem de importância das alternativas, são considerados:

- 1) Conjunto de Regras Básicas de Manutenibilidade;
- 2) Programação Multi-critério AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Desta forma, há necessidade de um detalhamento destes itens.

3.2.3.1 Conjunto de Regras Básica de Manutenibilidade – RBMs

As Regras Básicas de Manutenibilidade – RBMs são oriundas da compilação de boas práticas, no âmbito da manutenibilidade, que são definidas como pré-requisitos (ou mesmo requisitos) nas fases iniciais de projeto. O conjunto de RBMs tem como contexto o setor automotivo, notadamente, o de veículos pesados. Todavia, o que se observa é que sua aplicação pode ser estendida a outros segmentos (e.g.: eletrodomésticos, máquinas operatrizes, entre outros).

O conjunto original de RBMs é composto por mais de 250 regras derivadas da coleta de informações de diversas práticas de manutenção no ramo automobilístico de veículos pesados ao longo dos anos.

Para este trabalho, todas as regras foram analisadas uma a uma e após respectiva análise foi identificada a necessidade de criação de cinco grupos para separação das mesmas (i.e.: i/ Acessibilidade; ii/ Calibração; Abastecimento e Lubrificação; iii/ Diagnóstico; iv/ Desmontagem e Montagem; v/ Ferramentas), representados na Figura 46.

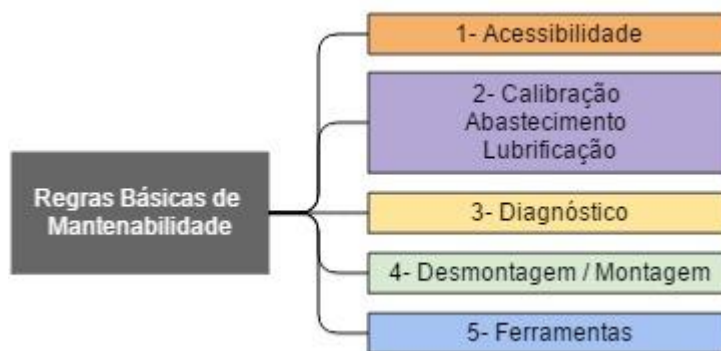


Figura 46 – Cinco grupos de critérios das RBMs

Como mencionado anteriormente, as regras foram oriundas da coleta de informações durante a prática de manutenção ao longo dos anos, isto fez com muitas regras tornassem-se repetitivas, variando apenas o componente em que elas eram aplicadas, portanto um trabalho de análise e compactação do número de regras foi executado, visando à obtenção de regras mais abrangentes e aplicáveis a diferentes sistemas e componentes, a Figura 47 exemplifica a análise e compactação realizada. Na sequência, as regras foram enquadradas nos grupos, conforme teor e diretriz. A Figura 48 apresenta um diagrama que ilustra o conjunto de RBMs para esta pesquisa.

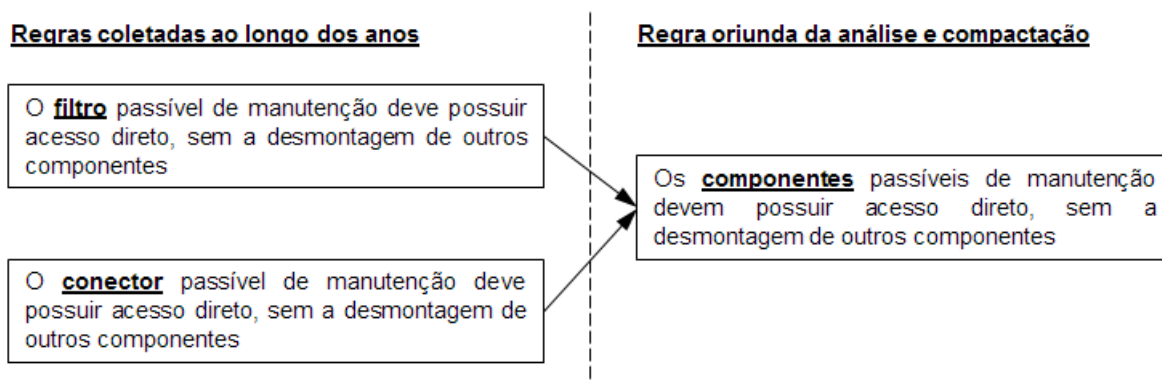


Figura 47 – Exemplo da análise e compactação das regras para obtenção das RBMs

Este conjunto de regras pode ser customizado para o contexto de projeto com o qual se está trabalhando.

Outro aspecto importante a ser observado é que a simples aplicação das RBMs não permite identificar a solução de maior potencial. Assim, na seção 3.2.3.2 tem-se a proposta apresentada para a priorização das RBMs.

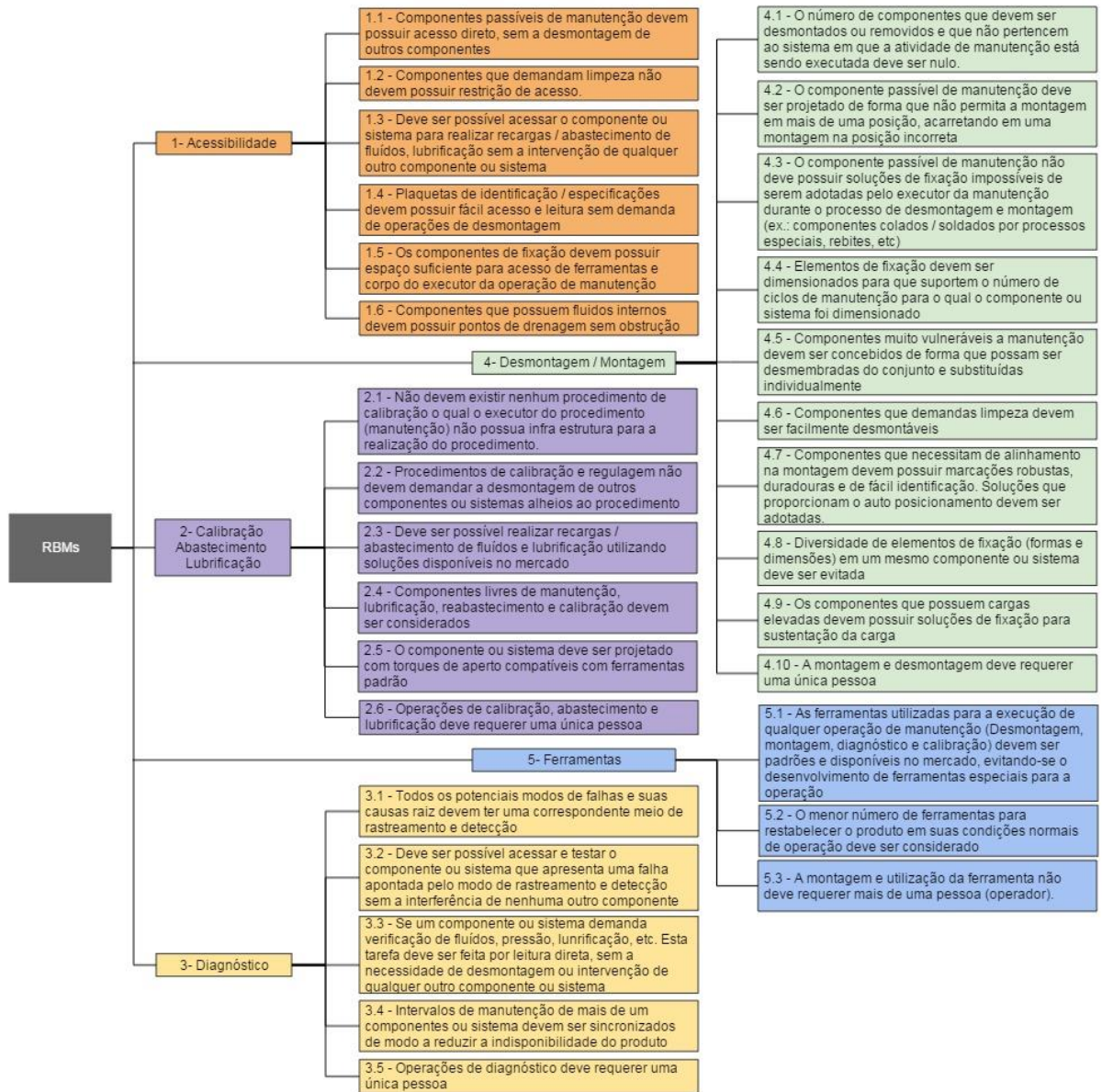


Figura 48 – Critérios de regras que compõe as RBMs e seus respectivos grupos

3.2.3.2 Programação multicritério *AHP* – *Analytic Hierarchy Process* para priorização das RBMs

Conforme já abordado na seção 2.5, a programação multicritério por meio do AHP é uma técnica estruturada para tomada de decisão em ambientes complexos em que diversas variáveis ou critérios são considerados para a priorização e seleção de alternativas ou projetos.

A metodologia emprega a sequência e fórmulas descritas em detalhes nas seções de 2.5.1.1 a 2.5.1.7, sendo que os passos para emprego da AHP aqui utilizados são:

- 1/ Definição do problema e o que se procura saber;
- 2/ Decomposição do problema estruturado em hierarquias sistemáticas;
- 3/ Elaboração das matrizes de comparação;
- 4/ Realização do julgamento dos elementos da matriz;
- 5/ Cálculo do índice e da razão de consistência;
- 6/ Estabelecimento das prioridades globais e locais dos critérios do segundo nível da hierarquia RBMs;
- 7/ Classificação dos itens de cada grupo de RBMs baseado nas prioridades locais e globais.

3.2.3.3 Definição do problema e o que se procura saber

Tomando como base a hierarquia da Figura 48, primeiramente, os cinco grupos precisam ser avaliados dois a dois, visando determinar a importância relativa entre eles e seu peso relativo na meta total. Para tanto, lança-se mão do emprego da programação multicritério AHP descrita na seção 2.5 e devidamente adaptada para avaliação de quesitos de manutenibilidade.

Esta determinação dos pesos de cada Grupo da RBMs ocorre no contexto da análise de manutenibilidade, na etapa de projeto (neste caso de veículos pesados). Assim, deve-se definir o subsistema de estudo (e.g.: exaustão, trem de força, tanque de ar, entre outros). Na sequência, conduz-se uma varredura no

conjunto de RBMs, visando identificar aquelas que aderem ao contexto do projeto do conjunto em questão.

Vale enfatizar que, neste momento, não se está avaliando o peso relativo das alternativas, mas sim, determinando-se o peso relativo dos cinco grupos de critérios (RBMs) quando aplicados na análise de manutenibilidade do sistema em questão, neste capítulo exemplificado pelo sistema de armazenamento de ar em veículos pesados, representado pela solução conceito (alternativas) de tanque de ar. Por fim, quando cada uma das RBMs possuir seu peso definido quando aplicadas à avaliação do sistema em questão (neste caso representado pelo sistema de armazenamento de ar em veículos pesados), as alternativas propostas (exemplificadas no Quadro 1) poderão ser comparadas com cada RBM e seu respectivo peso, obtendo-se assim um ordenamento de alternativas quanto ao atendimento dos critérios das RBMs.

3.2.3.4 Decomposição do problema desestruturado em hierarquias sistemáticas

Como uma hierarquia de RBMs já é sugerida por este método (Figura 48), nesta etapa não se tem um problema completamente desestruturado, e sim, uma hierarquia na qual se faz necessário avaliar se todos os itens pertencentes a cada um dos cinco grupos aplicam-se na análise de manutenibilidade do sistema em questão (exemplificado pelo sistema de armazenamento de ar em veículos pesados). Caso todos os itens de um grupo venham a ser eliminados por não serem aplicáveis, o grupo automaticamente é eliminado.

Considerando-se o sistema armazenamento de ar em veículos pesados como exemplo, a Figura 49 apresenta as 22 regras que influenciam no seu projeto, estas regras foram selecionadas pelo membro da equipe de projeto que detêm os conhecimentos de manutenibilidade. Aqui, oito delas foram eliminadas por não serem empregáveis na análise em questão.

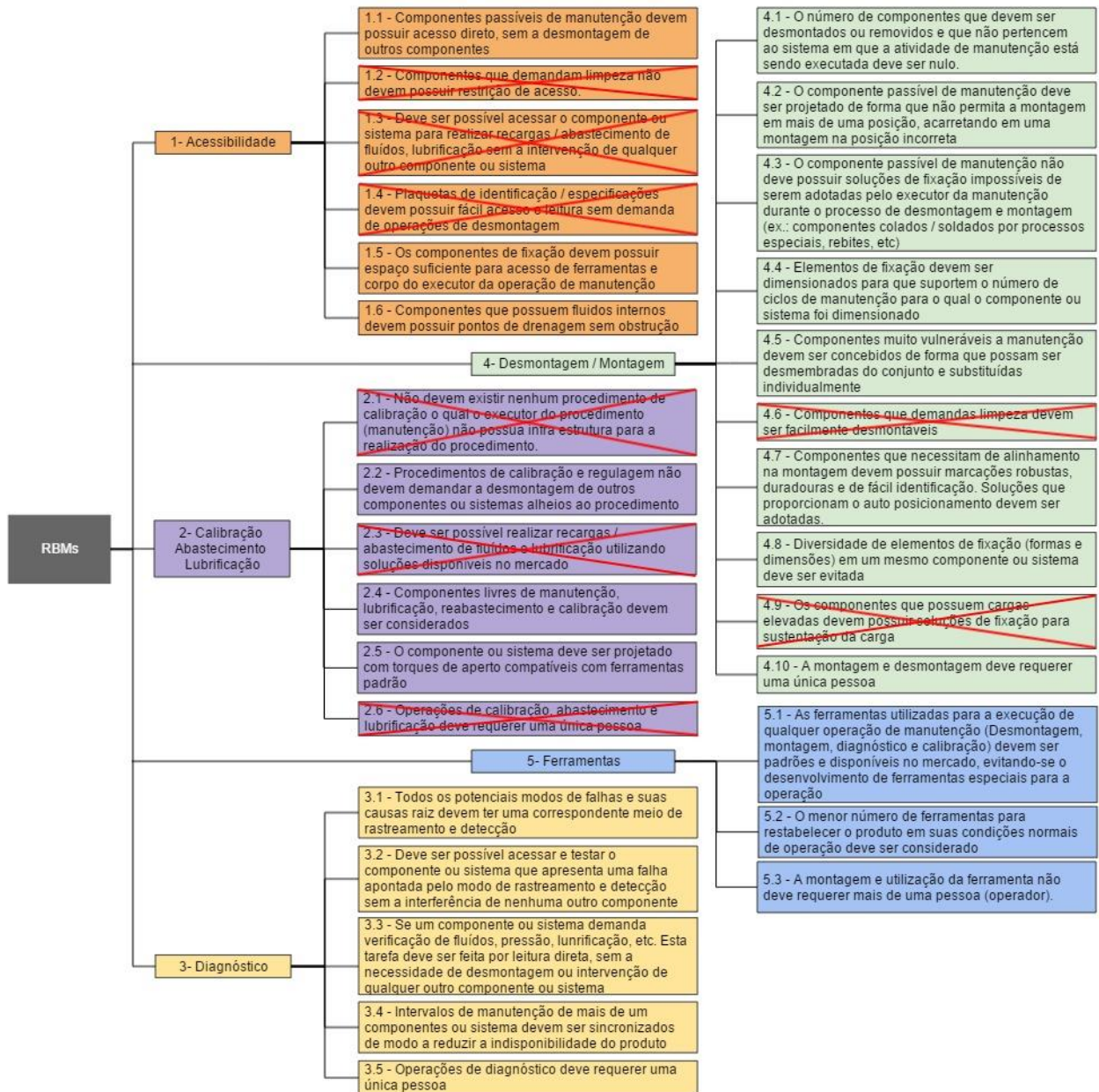


Figura 49 - Critérios que compõe as RBMs aplicáveis na análise de manutenibilidade de sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados

3.2.3.5 Elaboração das matrizes de comparação

Após a definição dos critérios que serão trabalhados, a avaliação se inicia pela determinação do peso relativo dos cinco grupos de critérios representados na Figura 46. A partir daí, é montada uma matriz de comparação conforme Figura 50.

	Acessibilidade	Calibracao	Diagnóstico	Desmontagem	Ferramentas
Acessibilidade	1				
Calibracao		1			
Diagnóstico			1		
Desmontagem				1	
Ferramentas					1

Figura 50 - Matriz comparativa para os cinco grupos de critérios das RBMs

Conforme já detalhado na seção 0, a diagonal principal da matriz possui o valor 1, pois cada elemento da linha e coluna está sendo comparado com ele mesmo.

3.2.3.6 Realização do julgamento dos elementos da matriz

Para se definir os pesos relativos entre os Grupos de RBMs, emprega-se a composição de escala relativa de importância, proposta por Saaty (SAATY, 1991) e descritas na Tabela 3 da seção 2.5.1. Neste caso, os Grupos são dispostos em linhas e colunas. Os pesos são definidos pela importância relativa de um Grupo em comparação a outro (e.g.: “Ferramentas” que apresentou 1/5 da relevância para o projeto com foco em manutenibilidade de tanques de ar que “Diagnóstico”). Visto que esta é uma matriz 5 x 5 o número de julgamentos que serão necessários pode ser obtido através de $5(5-1)/2$, ou seja, dez julgamentos. Como exemplo, após a realização de todos os julgamentos para o sistema de armazenamento de ar em veículos pesados, a matriz contida na Figura 51 foi obtida.

	Acessibilidade	Calibracao	Diagnóstico	Desmontagem	Ferramentas
Acessibilidade	1	7	1	2	7
Calibracao / Abastecimento / Lubrificação	1/7	1	1/5	1/5	1
Diagnóstico	1	5	1	3	5
Desmontagem / Montagem	1/2	5	1/3	1	5
Ferramentas	1/7	1	1/5	1/5	1

Figura 51 - Matriz comparativa com os julgamentos para os cinco grupos de critérios das RBMs (Detalhamento do Método)

Para o julgamento recomenda-se a participação de dois ou mais membros da equipe de projeto, estes membros devem ser de áreas distintas (e.g.: projetista

responsável pelo conceito proposto e engenheiro de serviço responsável pelos requisitos de manutenibilidade no projeto).

3.2.3.7 Cálculo do índice e da razão de consistência

Antes da determinação da razão de consistência propriamente dita, é necessário se obter os dados de entrada para os cálculos. A primeira etapa é normalizar a matriz comparativa exemplificada na Figura 51. A normalização se dá pela divisão de cada coluna da matriz com o valor total de cada coluna. O resultado obtido para o exemplo selecionado (sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados) pode ser observado na Figura 52. Na coluna “Acessibilidade” há um detalhamento de como efetivar a normalização.

	Acessibilidade	Calibracao	Diagnóstico	Desmontagem	Ferramentas
Acessibilidade	1	7	1	2	7
Calibracao / Abastecimento / Lubrificação	1/7	1	1/5	1/5	1
Diagnóstico	1	5	1	3	5
Desmontagem / Montagem	1/2	5	1/3	1	5
Ferramentas	1/7	1	1/5	1/5	1
Total (Soma)	2.79	19.00	2.73	6.40	19.00
	Resultados				
Acessibilidade	1 / 2.79 = 0.36	0.37	0.37	0.31	0.37
Calibracao / Abastecimento / Lubrificação	0.14 / 2.79 = 0.05	0.05	0.07	0.03	0.05
Diagnóstico	1 / 2.79 = 0.36	0.26	0.37	0.47	0.26
Desmontagem / Montagem	0.50 / 2.79 = 0.18	0.26	0.12	0.16	0.26
Ferramentas	0.14 / 2.79 = 0.05	0.05	0.07	0.03	0.05

Figura 52 - Matriz comparativa normalizada para os cinco grupos de critérios das RBMs

A determinação da contribuição de cada um dos cinco Grupos de RBMs na manutenibilidade do sistema em estudo é calculada a partir do vetor de prioridade ou auto-vetor. O auto-vetor apresenta os pesos relativos entre os critérios e é obtido de modo aproximado através da média aritmética dos valores de cada um dos critérios. Na Figura 53 tem-se os auto-vetores obtidos para o contexto do projeto de sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados. Observa-se que o somatório dos valores do auto-vetor sempre totaliza um.

	Auto-vetor (Parcelas)	Auto-vetor
Acessibilidade	$(0.36 + 0.37 + 0.37 + 0.31 + 0.37) / 5$	0.35 (35%)
Calibração / Abastecimento / Lubrificação	$(0.05 + 0.05 + 0.07 + 0.03 + 0.05) / 5$	0.05 (5%)
Diagnóstico	$(0.36 + 0.26 + 0.37 + 0.47 + 0.26) / 5$	0.34 (34%)
Desmontagem / Montagem	$(0.18 + 0.26 + 0.12 + 0.16 + 0.26) / 5$	0.20 (20%)
Ferramentas	$(0.05 + 0.05 + 0.07 + 0.03 + 0.05) / 5$	0.05 (14%)

Figura 53 – Cálculo do auto-vetor para os cinco grupos de RBMs

Os valores encontrados para o auto-vetor tem significado direto na manutenibilidade do sistema que está sendo examinado. Ele determina a participação ou o peso daquele elemento do Grupo no resultado total das regras RBMs aplicáveis. Por exemplo, no caso da manutenção de sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados, o critério Acessibilidade teve um peso de 35% (cálculo aproximado do auto-vetor) em relação aos outros cinco itens do Grupo de RBMs.

O último valor a ser obtido é o auto-valor máximo, que é calculado através do somatório do produto de cada elemento do auto-vetor pelo valor total da somatória da respectiva coluna da matriz de comparação, na Figura 54 tem-se o auto-valor máximo obtido para o sistema de armazenamento de ar em veículos pesados.

Auto vetor	0.35	0.05	0.34	0.20	0.05
Total (Soma)	2.79	19.00	2.73	6.40	19.00
Auto valor máximo ($\lambda_{Máx}$)	$[(0.35 \times 2.79) + (0.05 \times 19.00) + (0.34 \times 2.73) + (0.20 \times 6.40) + (0.05 \times 19.00)] = 5.17$				

Figura 54 – Cálculo do auto-valor máximo

O próximo passo do processo é verificar a consistência dos dados. A verificação visa captar se os tomadores de decisão foram consistentes nas suas opiniões para a tomada de decisão (TEKNOMO, 2006). Se, por exemplo, os tomadores de decisão, no contexto de projeto de sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados afirmassem que a “Acessibilidade” é mais importante do que “Diagnóstico”, e que este, por sua vez, é mais importante que “Desmontagem e Montagem”, haveria uma inconsistência na tomada de decisão, se eles afirmassem

que o “Desmontagem e Montagem” é mais importante que “Acessibilidade” (e.g.: se $A > B$ e $B > C$ seria inconsistente afirmar que $A < C$).

Como exemplo, após a realização do cálculo do Índice de Consistência (IC) (SAATY, 2005) demonstrado na equação (6), no contexto de projeto de sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados, obteve-se a equação (9).

$$IC = \frac{5.17 - 5}{5 - 1} = 0.04 \quad (9)$$

Visando verificar se o valor encontrado para o índice de consistência é adequado, Saaty (2005) propôs o que foi chamado de razão de consistência, representado na equação (5). Realizando o cálculo da Razão de Consistência (RC), no contexto de projeto de sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados, obteve-se a equação (10).

$$RC = \frac{0.0429}{1.12} = 0.04 = 4\% \quad (10)$$

Como o valor obtido para a Razão de Consistência é menor que 0,1 ou 10%, a matriz pôde ser considerada consistente. Com isso, os resultados de critérios de prioridade entre os cinco grupos pode ser observado na Figura 55.

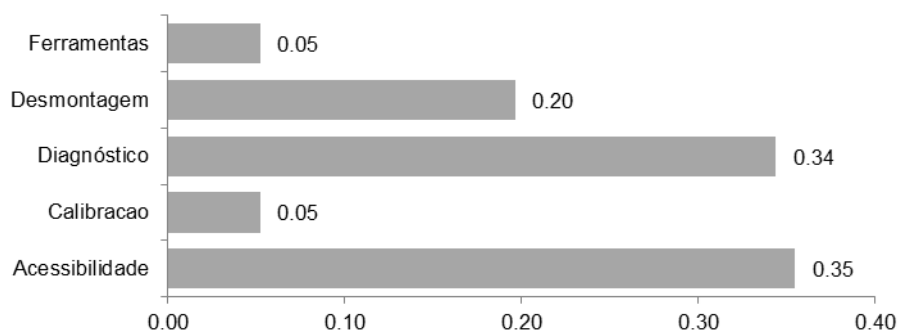


Figura 55 - Resultados da matriz comparativa de critérios para os cinco grupos de RBMs, evidenciando a contribuição de cada critério

Pelos valores do auto-vetor apresentados na Figura 55, evidencia-se que a “Acessibilidade” tem 35% de contribuição na manutenção de sistemas de

armazenamento de ar em veículos pesados, enquanto a “Calibração e Ferramentas” contribuem com 5%.

Igualmente ao que foi produzido para os cinco grupos de RBMs faz-se necessário conduzir o desdobramento de cada uma das regras mapeadas para o Grupo (Figura 56). Esse processo é idêntico ao descrito nas seções 0 a 2.5.1.5.

As matrizes comparativas e os valores obtidos para o Índice e Razão de consistência estão demonstrados no APÊNDICE A. Nenhuma das matrizes comparativas obtidas apresentou Razão de Consistência acima do tolerável (0,1 ou 10%).

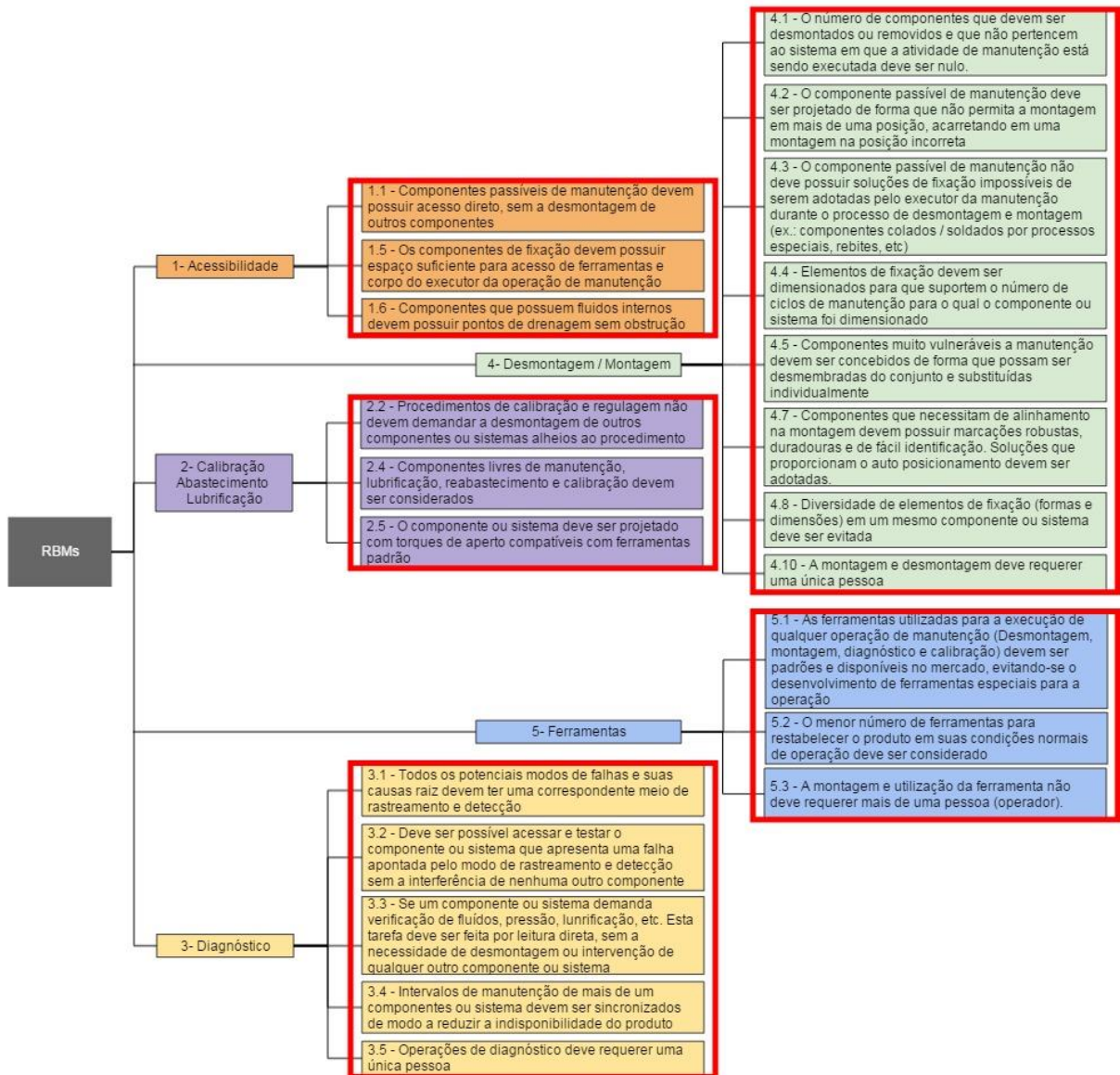


Figura 56 - Hierarquia de critérios das RBMs com destaque para o segundo nível da hierarquia

3.2.3.8 Estabelecimento das prioridades globais e locais dos critérios do segundo nível da hierarquia das RBMs

A prioridade global de cada um dos critérios é determinada através da multiplicação de cada prioridade do primeiro nível por sua respectiva no segundo nível. Os resultados obtidos para o sistema de armazenamento de ar em veículos pesados são apresentados na hierarquia da Figura 57. Observa-se, também, que a soma dos pesos de todos os fatores totaliza um.

RBMs

1 - Acessibilidade	0.35
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes	0.06
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção	0.21
1.6- Componentes que possuem fluidos internos devem possuir pontos de drenagem sem obstrução	0.09
2 - Calibração / Abastecimento / Lubrificação	0.05
2.2- Procedimentos de calibração e regulagem não devem demandar a desmontagem de outros componentes ou sistemas alheios ao procedimento	0.01
2.4- Componentes livres de manutenção, lubrificação, reabastecimento e calibração devem ser considerados	0.03
2.5- O componente ou sistema deve ser projetado com torques de aperto compatíveis com ferramentas padrão	0.01
3 - Diagnóstico	0.34
3.1- Todos os potenciais modos de falhas e suas causas raiz devem ter uma correspondente meio de rastreamento e detecção	0.09
3.2- Deve ser possível acessar e testar o componente ou sistema que apresenta uma falha apontada pelo modo de rastreamento e detecção sem a interferência de nenhuma outro componente	0.10
3.3- Se um componente ou sistema demanda verificação de fluidos, pressão, lunrificação, etc. Esta tarefa deve ser feita por leitura direta, sem a necessidade de desmontagem ou intervenção de qualquer outro componente ou sistema	0.09
3.4- Intervalos de manutenção de mais de um componentes ou sistema devem ser sincronizados de modo a reduzir a indisponibilidade do produto	0.02
3.5- Operações de diagnóstico deve requerer uma única pessoa	0.04
4 - Desmontagem / Montagem	0.20
4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.	0.01
4.2- O componente passível de manutenção deve ser projetado de forma que não permita a montagem em mais de uma posição, acarretando em uma montagem na posição incorreta	0.01
4.3- O componente passível de manutenção não deve possuir soluções de fixação impossíveis de serem adotadas pelo executor da manutenção durante o processo de desmontagem e montagem (ex.: componentes colados / soldados por processos especiais, rebites, etc)	0.04
4.4- Elementos de fixação devem ser dimensionados para que suportem o número de ciclos de manutenção para o qual o componente ou sistema foi dimensionado	0.04
4.5- Componentes muito vulneráveis a manutenção devem ser concebidos de forma que possam ser desmembradas do conjunto e substituídas individualmente	0.06
4.7- Componentes que necessitam de alinhamento na montagem devem possuir marcações robustas, duradouras e de fácil identificação. Soluções que proporcionam o auto posicionamento devem ser adotadas.	0.02
4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada	0.01
4.10- A montagem e desmontagem deve requerer uma única pessoa	0.01
5 - Ferramentas	0.05
5.1- As ferramentas utilizadas para a execução de qualquer operação de manutenção (Desmontagem, montagem, diagnóstico e calibração) devem ser padrões e disponíveis no mercado, evitando-se o desenvolvimento de ferramentas especiais para a operação	0.01
5.2- O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado	0.01
5.3- A montagem e utilização da ferramenta não deve requerer mais de uma pessoa (operador).	0.04

Figura 57 - Hierarquia de critérios das RBMs com as prioridades globais de cada um dos critérios

3.2.3.9 Classificação dos itens de cada grupo das RBMs baseado nas prioridades locais e globais.

Com a árvore estruturada e as prioridades dos critérios estabelecidas, é possível determinar agora como cada uma das alternativas propostas contempla as RBMs. De forma similar à empregada para a priorização das RBMs, os conceitos são confrontados dois a dois, considerando cada um dos critérios estabelecidos. Para o exemplo proposto, foram identificadas três alternativas (Quadro 1) que precisavam ser ordenadas do ponto de vista de manutenibilidade.

Para aplicar a AHP, as alternativas devem ser comparadas com as RBMs selecionadas (para o exemplo proposto foram selecionadas 22 RBMs demonstradas na Figura 56). Ao se calcular todas as prioridades, índices e razões de consistência é possível determinar o peso relativo de cada uma das alternativas em cada um dos critérios. Na Figura 58 é possível observar os resultados obtidos para o critério 1.5 (Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção) das RBMs quando submetido aos três exemplos de alternativas demonstrados no Quadro 1. Os demais resultados obtidos estão contidos no APÊNDICE B, que contém 21 tabelas com os valores obtidos.

O cruzamento entre todas as avaliações das alternativas em todos os critérios determina o valor final de cada uma das alternativas com relação à manutenibilidade. O mecanismo para definição da ordem pode ser determinado pelo somatório dos produtos entre o peso de prioridade da alternativa e o peso das RBMs individuais. Para exemplificar o processo, os valores obtidos para os três exemplos de alternativas (Quadro 1) estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores utilizados para definição das prioridades entre as três alternativas analisadas

	Peso do Critério	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.
1 - Acessibilidade							
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes	0.06	0.33	0.02	0.33	0.02	0.33	0.02
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção	0.21	0.60	0.13	0.20	0.04	0.20	0.04
1.6- Componentes que possuem fluidos internos devem possuir pontos de drenagem sem obstrução	0.09	0.33	0.03	0.33	0.03	0.33	0.03
2 - Calibração / Abastecimento / Lubrificação							
2.2- Procedimentos de calibração e regulagem não devem demandar a desmontagem de outros componentes ou sistemas alheios ao procedimento	0.01	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00
2.4- Componentes livres de manutenção, lubrificação, reabastecimento e calibração devem ser considerados	0.03	0.33	0.01	0.33	0.01	0.33	0.01
2.5- O componente ou sistema deve ser projetado com torques de aperto compatíveis com ferramentas padrão	0.01	0.14	0.00	0.14	0.00	0.71	0.01
3 - Diagnóstico							
3.1- Todos os potenciais modos de falhas e suas causas raiz devem ter uma correspondente meio de rastreamento e detecção	0.09	0.33	0.03	0.33	0.03	0.33	0.03
3.2- Deve ser possível acessar e testar o componente ou sistema que apresenta uma falha apontada pelo modo de rastreamento e detecção sem a interferência de nenhuma outro componente	0.10	0.33	0.03	0.33	0.03	0.33	0.03
3.3- Se um componente ou sistema demanda verificação de fluidos, pressão, lubrificação, etc. Esta tarefa deve ser feita por leitura direta, sem a necessidade de desmontagem ou intervenção de qualquer outro componente ou sistema	0.09	0.33	0.03	0.33	0.03	0.33	0.03
3.4- Intervalos de manutenção de mais de um componentes ou sistema devem ser sincronizados de modo a reduzir a indisponibilidade do produto	0.02	0.33	0.01	0.33	0.01	0.33	0.01
3.5- Operações de diagnóstico deve requerer uma única pessoa	0.04	0.33	0.01	0.33	0.01	0.33	0.01
4 - Desmontagem / Montagem							
4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.	0.01	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00
4.2- O componente passível de manutenção deve ser projetado de forma que não permita a montagem em mais de uma posição, acarretando em uma montagem na posição incorreta	0.01	0.09	0.00	0.45	0.01	0.45	0.01
4.3- O componente passível de manutenção não deve possuir soluções de fixação impossíveis de serem adotadas pelo executor da manutenção durante o processo de desmontagem e montagem (ex.: componentes colados / soldados por processos especiais, rebites, etc)	0.04	0.33	0.01	0.33	0.01	0.33	0.01
4.4- Elementos de fixação devem ser dimensionados para que suportem o número de ciclos de manutenção para o qual o componente ou sistema foi dimensionado	0.04	0.33	0.01	0.33	0.01	0.33	0.01
4.5- Componentes muito vulneráveis a manutenção devem ser concebidos de forma que possam ser desmembradas do conjunto e substituídas individualmente	0.06	0.60	0.04	0.20	0.01	0.20	0.01
4.7- Componentes que necessitam de alinhamento na montagem devem possuir marcações robustas, duradouras e de fácil identificação. Soluções que proporcionam o auto posicionamento devem ser adotadas.	0.02	0.09	0.00	0.45	0.01	0.45	0.01
4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada	0.01	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00
4.10- A montagem e desmontagem deve requerer uma única pessoa	0.01	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00
5 - Ferramentas							
5.1- As ferramentas utilizadas para a execução de qualquer operação de manutenção (Desmontagem, montagem, diagnóstico e calibração) devem ser padrões e disponíveis no mercado, evitando-se o desenvolvimento de ferramentas especiais para a operação	0.01	0.14	0.00	0.14	0.00	0.71	0.00
5.2- O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado	0.01	0.14	0.00	0.14	0.00	0.71	0.01
5.3- A montagem e utilização da ferramenta não deve requerer mais de uma pessoa (operador).	0.04	0.33	0.01	0.33	0.01	0.33	0.01
Resultados			0.39		0.30		0.31

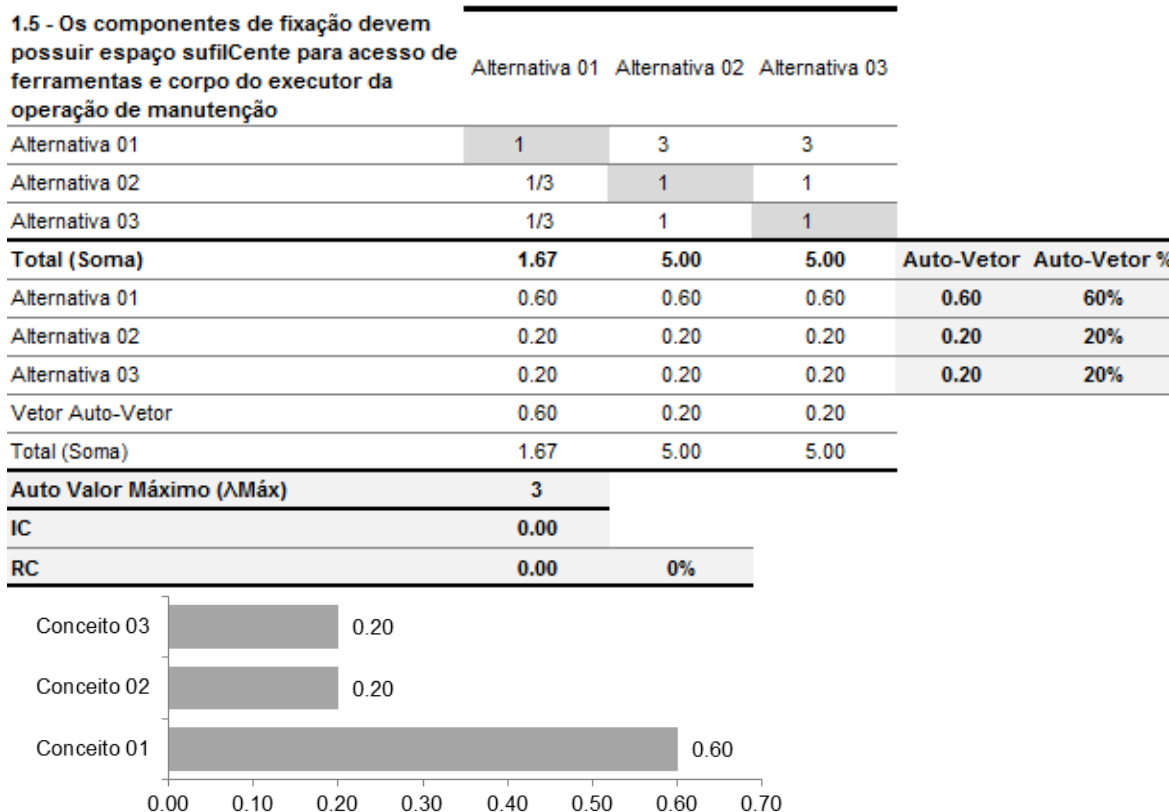


Figura 58 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.5 das RBMs

Os percentuais obtidos para cada uma das alternativas de exemplo podem ser observados na Figura 59.

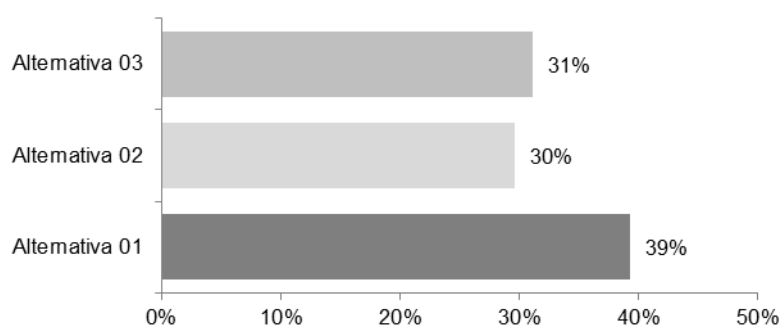


Figura 59 – Resultado final da priorização das três alternativas em relação às RBMs

Pela Figura 59, a alternativa que apresentou maior aderência ao conjunto de RBMs é a Alternativa 01. Ela contribui em 39% (0,39) no quesito manutenibilidade contra 30% (0,30) e 31% (0,31) das Alternativas 02 e 03, respectivamente. Portanto, a alternativa selecionada do ponto de vista de atendimento a RBMs para sistemas de armazenamento de ar em veículos pesados é a alternativa 01.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MÉTODO

Esse método suporta e qualifica as decisões, além de permitir que os responsáveis por avaliar quesitos de manutenibilidade nas fases iniciais de projetos, simulem os resultados e justifiquem suas escolhas.

Neste capítulo, buscou-se mostrar os principais passos de aplicação do método durante a análise de manutenibilidade, visando propiciar à equipe de projeto o entendimento e julgamento adequado das regras básicas de manutenibilidade.

Com a conclusão do processo de classificação e com a obtenção da alternativa de maior representatividade do ponto de vista de manutenibilidade, é fundamental que algumas informações sejam documentadas e comunicadas ao time projeto como um todo. Portanto, os passos sugeridos são:

- a/ Documentar o volume de varredura (*sweep volume*) obtido para a alternativa de maior aderência às RBMs. Este volume tridimensional deve ser documentado na montagem tridimensional do produto na fase de projeto buscando, desta forma, informar todos os projetistas que este volume deve ser preservado por se tratar de uma rota de manutenção, sendo que qualquer invasão desta região deve ser informada e o impacto discutido dentro de time de projeto;
- b/ Relatórios de manutenibilidade podem ser emitidos, separados por alternativas analisadas. Com esta ferramenta, a equipe de projeto pode estar apta a identificar quais os itens estão com menor avaliação nas matrizes comparativas, podendo, desta maneira, aprimorar uma determinada alternativa para que ela se torne a mais viável do ponto de vista de manutenibilidade também. Com as regras claras e os itens com menor avaliação evidentes, até mesmo o projetista que não possui um conhecimento mais profundo de manutenibilidade está apto a identificar pontos de melhorias obtendo resultados mais robustos.

No capítulo 4 este método foi submetido à validação, buscando-se confrontá-lo com uma situação real imposta pela indústria.

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Neste capítulo, será apresentada a aplicação do método para análise classificatória baseada em vetores de manutenibilidade, através da utilização de conceitos reais já discutidos anteriormente durante as fases de projeto conceitual. O objetivo principal foi verificar como o método se comporta diante de uma situação real de projeto, os possíveis resultados e seus benefícios. A aplicação ideal para este método seria no desenvolvimento de um produto ou sua concepção na íntegra. Porém, não foi possível o sincronismo deste trabalho com um projeto representativo. Acredita-se que com a seleção, apresentação e julgamento de casos passados, já se torne possível evidenciar a usabilidade do método proposto nesta dissertação como suporte ao estudo de manutenibilidade.

Devido à confidencialidade das informações na indústria, os modelos CAD usados nesta aplicação são de domínio público e foram adaptados para o contexto deste trabalho, sendo que algumas marcas de veículos e componentes foram combinadas de maneira não existentes no mercado, visando à descaracterização. Apesar do retrabalho dos modelos CAD, a representatividade crítica da montagem tridimensional obtida para a validação dos casos vivenciados em projeto se manteve.

4.1 REALIZAÇÃO DA ANÁLISE

A realização da análise ocorreu baseada em uma montagem tridimensional de um veículo comercial (Figura 60). O objetivo da análise era classificar o quão a operação de substituição de um item de desgaste (embreagem) atendia as RBMs e era influenciada por três diferentes reforços de longarina do chassi do veículo. Um ponto importante a ser observado é que o sistema de embreagem do veículo não estava sendo desenvolvido neste momento. Porém, a sua manutenibilidade era bastante influenciada pelos componentes que estavam montados ao seu redor. Neste caso, os conceitos em desenvolvimento eram as longarinas de reforço do chassi e sua localização no veículo.

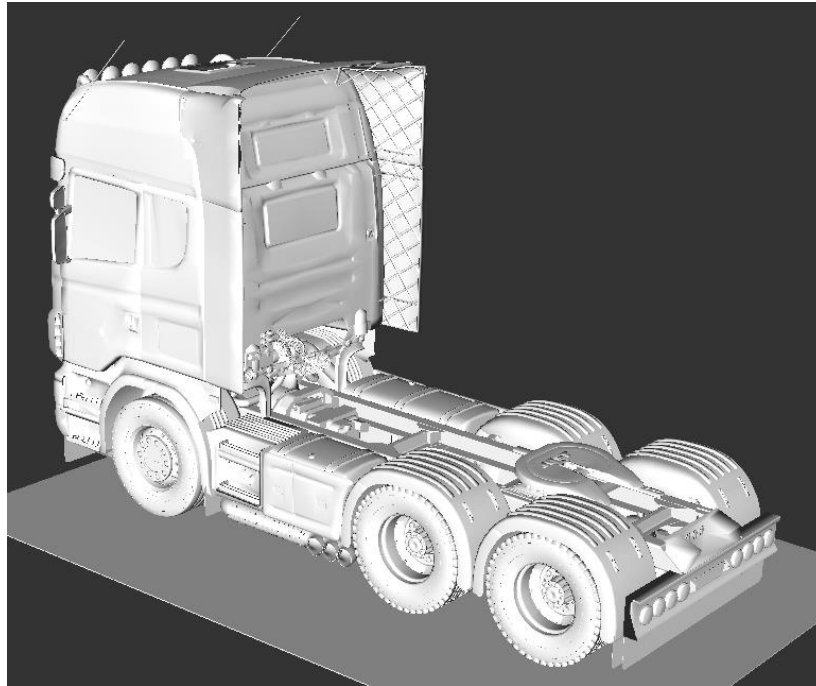


Figura 60 – Montagem tridimensional de um veículo comercial
Fonte: Adaptado de *TF3DM: 3D Scania Models* (2015)

4.1.1 Caracterização do cenário e das alternativas

A operação que foi avaliada foi a troca da embreagem (Figura 61) do veículo. Para a realização da troca da embreagem os seguintes passos devem ser respeitados:

- 1/ Aplicar o freio de estacionamento;
- 2/ Desligar a chave geral do veículo;
- 3/ Drenar o sistema de ar do veículo;
- 4/ Elevar o veículo a fim de se obter um vão (altura) livre de trabalho de 700 milímetros em relação ao piso;
- 5/ Desconectar as conexões elétricas da caixa de transmissão;
- 6/ Desconectar as conexões pneumáticas da caixa de transmissão;
- 7/ Remover a árvore de transmissão do veículo;
- 8/ Desacoplar a caixa de transmissão do veículo;
- 9/ Substituir a embreagem.

Para a montagem do veículo os passos de 1 a 9 devem ser executados em ordem inversa.

Os passos de 1 a 7 não foram considerados durante a análise do método, por serem classificados como passos de preparação e se repetirem exatamente da mesma forma para as três alternativas submetidas ao método. Caso os passos de 1 a 7 fossem mantidos pela equipe de projeto durante a aplicação do método, os resultados não seriam afetados. Apenas um tempo desnecessário seria adicionado à análise, pelo fato dos componentes estarem instalados distantes dos reforços das longarinas e seu acesso, e a desmontagem e montagem desses componentes não ser influenciada pelos conceitos em análise. Era de conhecimento que passos adicionais poderiam existir, como consequência da escolha de uma determinada alternativa, como exemplo, a remoção e posterior instalação do sistema de exaustão (i.e.: escapamento do veículo). Pelo fato do sistema de exaustão não pertencer ao sistema de transmissão ele não deveria ser violado, evitando-se assim a introdução de falhas futuras em sistemas que não são alvos da operação de manutenção em questão (substituição da embreagem). Este tipo de ocorrência indesejada foi capturada pelo método.

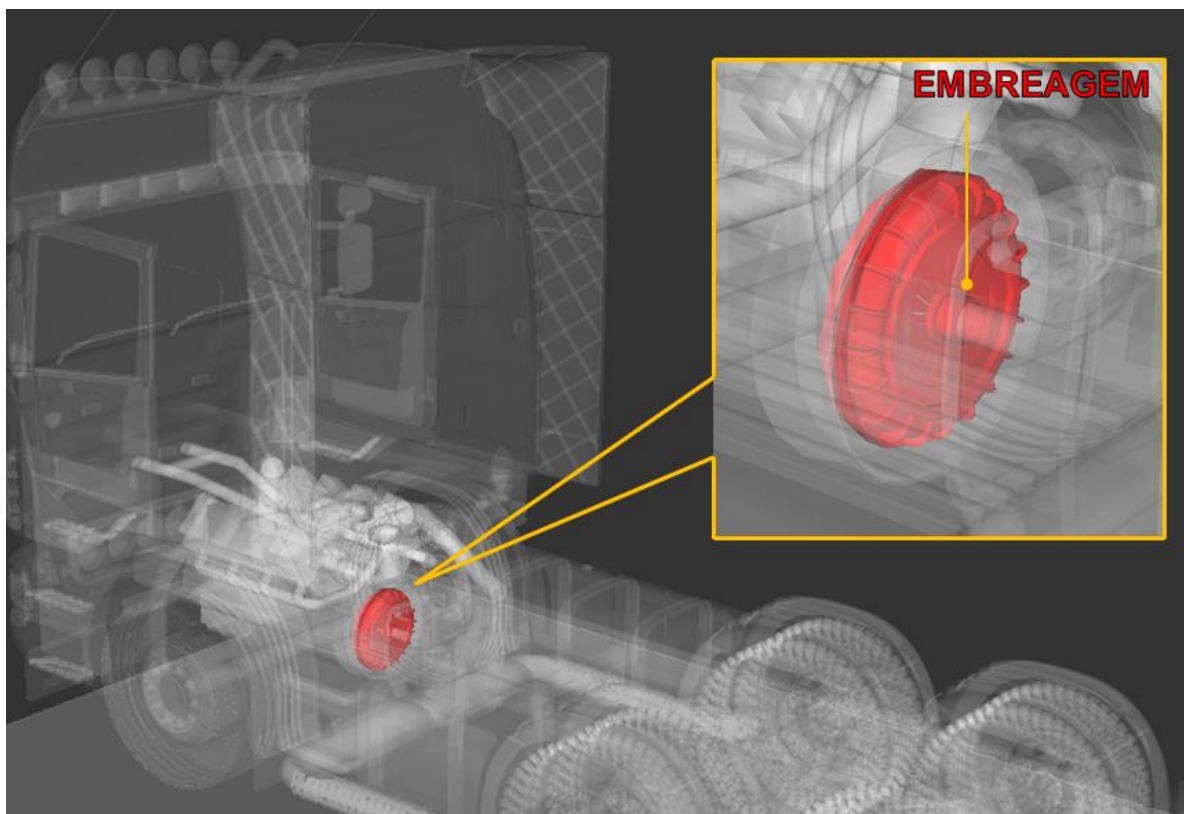


Figura 61 – Ênfase no componente alvo da operação de manutenção (embreagem)

Após o estabelecimento do cenário para a análise, as três alternativas de reforço da longarina do chassi do veículo submetidas ao método foram:

Alternativa 01

Na Alternativa 01, demonstrada na Figura 62, o reforço da longarina do chassi estava bem próximo à região de transição entre o motor e a caixa de transmissão do veículo. Esta alternativa é comumente proposta pelo time de projeto pelo fato de não obstruir a região de circulação do motorista atrás da cabine e, também, por não ocupar regiões mais “nobres” ao longo da longarina, que podem ser ocupadas por outros componentes, tais como, tanques de armazenamento de ar, unidades de controle, entre outros.

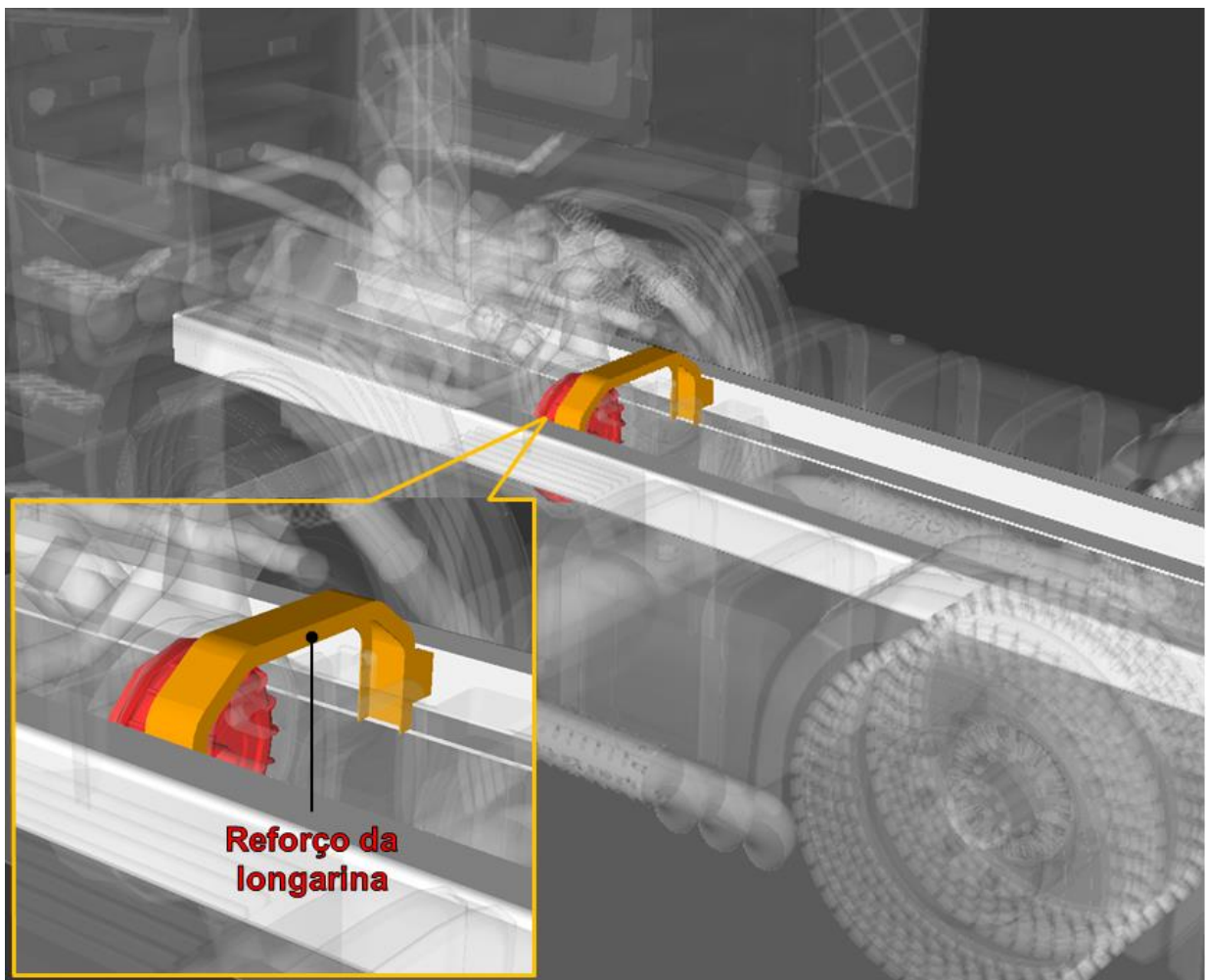


Figura 62 – Alternativa 01 para o reforço da longarina

Alternativa 02

A Alternativa 02, demonstrada na Figura 63, possuía o reforço da longarina posicionado um pouco mais para a região traseira do veículo, ocupando, portanto, uma área um pouco mais desejada para a instalação de outros componentes que são suportados pelo chassi.

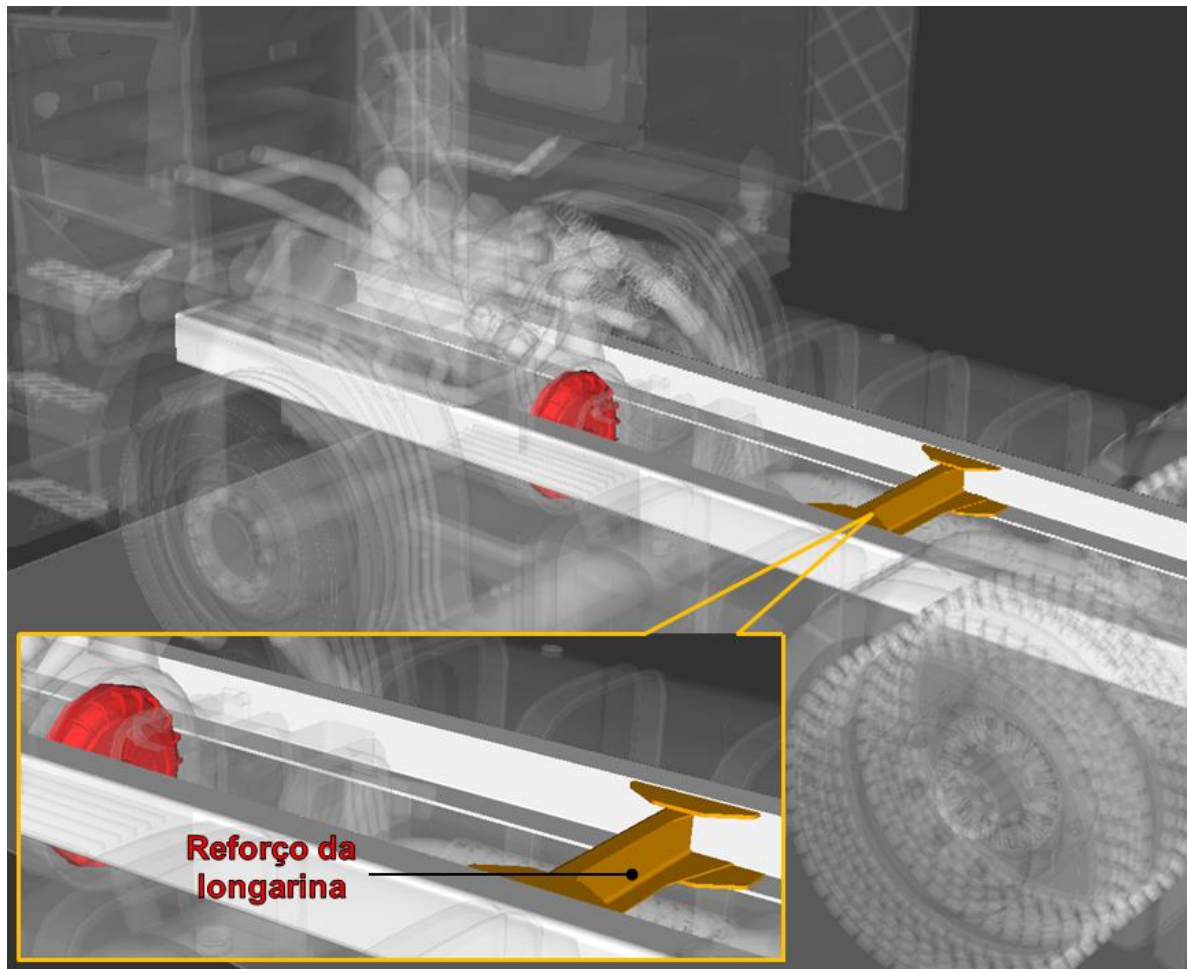


Figura 63 – Alternativa 02 para o reforço da longarina

Alternativa 03

A Alternativa 03, demonstrada na Figura 64, propôs um reforço da longarina posicionado basicamente, na mesma região do veículo onde a Alternativa 02 estava localizada. Porém, com um perfil curvado para baixo. Esta é uma proposta que favorece bastante a montagem do conjunto do trem de força (composto por motor, embreagem e caixa de transmissão) na linha de montagem, pois o processo de instalação do trem de força no chassi durante a fabricação do veículo se dá pela

parte superior. Portanto, esta era uma alternativa bastante desejada pelo grupo de manufatura.

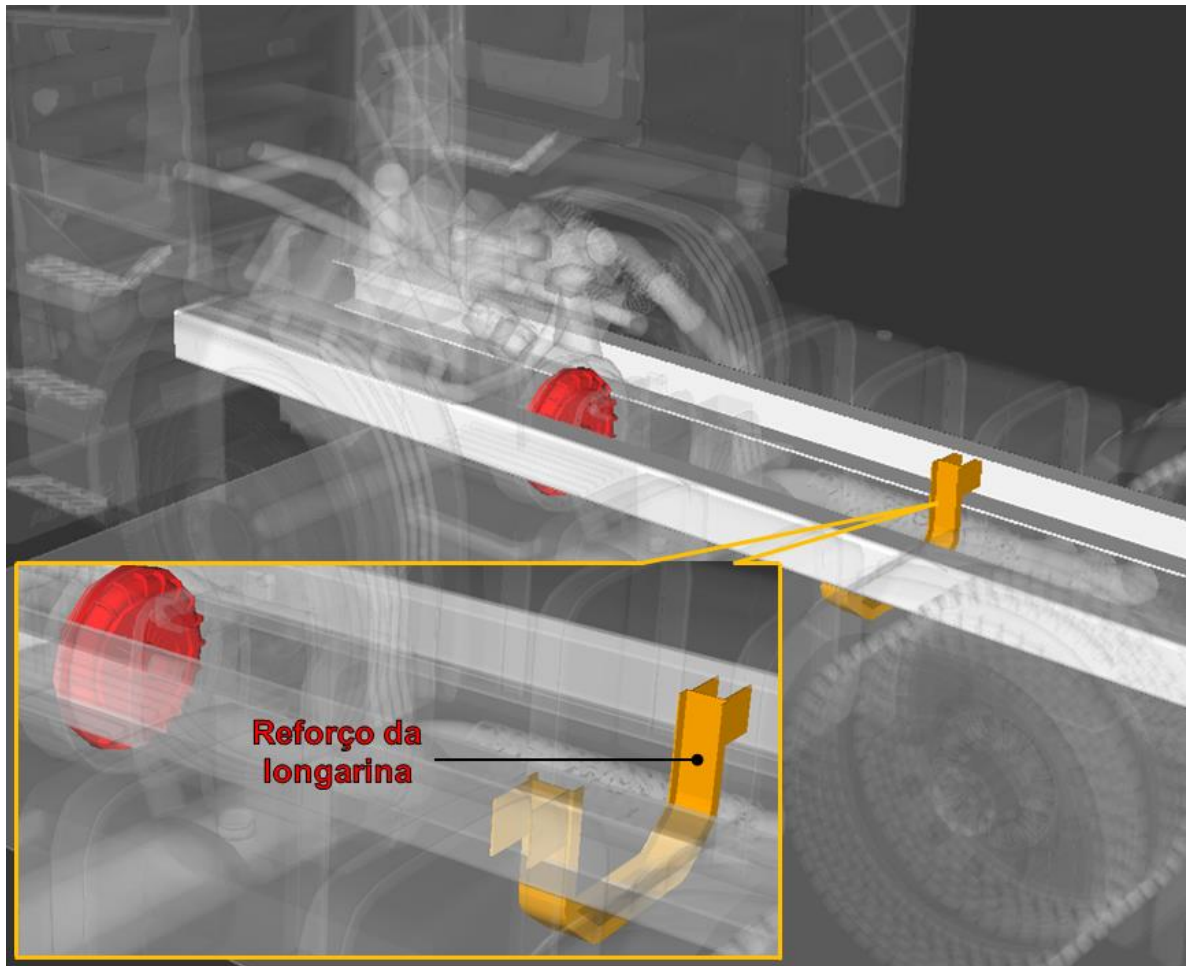


Figura 64 – Alternativa 03 para o reforço da longarina

4.1.2 Aplicação do método nas alternativas propostas

Esta seção visa descrever os procedimentos adotados para a aplicação da análise classificatória baseada em vetores de manutenibilidade, proposta na Figura 38 da Seção 3.2. Objetivou-se classificar como a operação de substituição (manutenção) da embreagem atendeu as RBMs e foi influenciada pelas três diferentes alternativas de reforço de longarina do chassi do veículo, apresentadas na seção 4.1.1.

4.1.2.1 Etapa 1: Identificação de possíveis conceitos

As alternativas 01, 02 e 03 (conceitos) já apresentadas na seção 4.1.1 foram, portanto, os conceitos a serem submetidos à análise.

Nesta etapa, as alternativas aderiram integralmente aos pressupostos estabelecidos na Seção 3.1.

4.1.2.2 Etapa 2: Estudo de rotas de manutenção

Nesta etapa, os passos descritos na Seção 3.2.2 foram aplicados.

Vale ressaltar que, conforme já listado na Seção 4.1.1, os passos relevantes e que realmente requeriam atenção especial neste estudo eram os passos 8 e 9 (Figura 65), e que são relacionados, respectivamente, à remoção da caixa de transmissão e substituição da embreagem. Os demais passos foram classificados como simples e repetitivos na avaliação das três alternativas, não necessitando exame mais aprofundado.

O passo 8, referente a remoção / instalação da caixa de transmissão também foi um passo que necessitou ser repetido nas três alternativas. Porém, como a remoção da caixa de transmissão requer atenção redobrada, devido ao peso e volume que o componente ocupa no veículo, não ficando claro se o mesmo pode ou não ser removido quando os conceitos propostos de reforços da longarina são aplicados, este passo foi mantido. Para a remoção da caixa de transmissão uma ferramenta especial (carrinho – Figura 66) foi empregada devido ao peso e risco de acidente para o mecânico. O peso da caixa de transmissão faz também com que movimentos diversos se tornem difícil.

Os carrinhos disponíveis no mercado utilizados para remoção de caixas de transmissão somente possibilitam translação, sendo que grandes movimentos⁴ de

⁴ Em geral, os carrinhos disponíveis no mercado possuem mecanismos que possibilitam pequenos movimentos de rotação, apenas para facilitar pequenos ajustes durante a montagem, como alinhamento de furos para encaixe de parafusos de fixação. Devido à magnitude dos movimentos de translação para remoção da caixa de transmissão ser bem maior, estes pequenos movimentos de rotação foram simplificados e anulados durante a análise.

rotação se tornam restritos nesta operação. Isto foi considerado no estudo de rotas de manutenção.

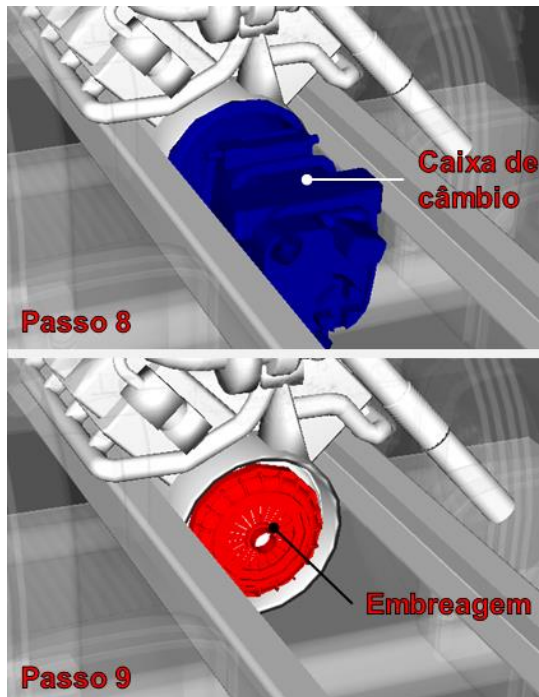


Figura 65 – Componentes alvos do estudo de rotas de manutenção



Figura 66 – Exemplo de um carrinho (disponível para aquisição no mercado) para remoção de caixa de transmissão e seus respectivos graus de liberdade
 Fonte: Ferramenta para remoção de caixa de transmissão WeberUK (2015)

Para o estudo de rotas de manutenção⁵ é necessário estabelecer o ponto inicial e final do componente, sendo que, para esta análise, o ponto inicial tanto para a embreagem como para a caixa de transmissão foi a posição dos componentes montados. O ponto final, ou seja, após a desmontagem dos componentes está demonstrado na Figura 67.

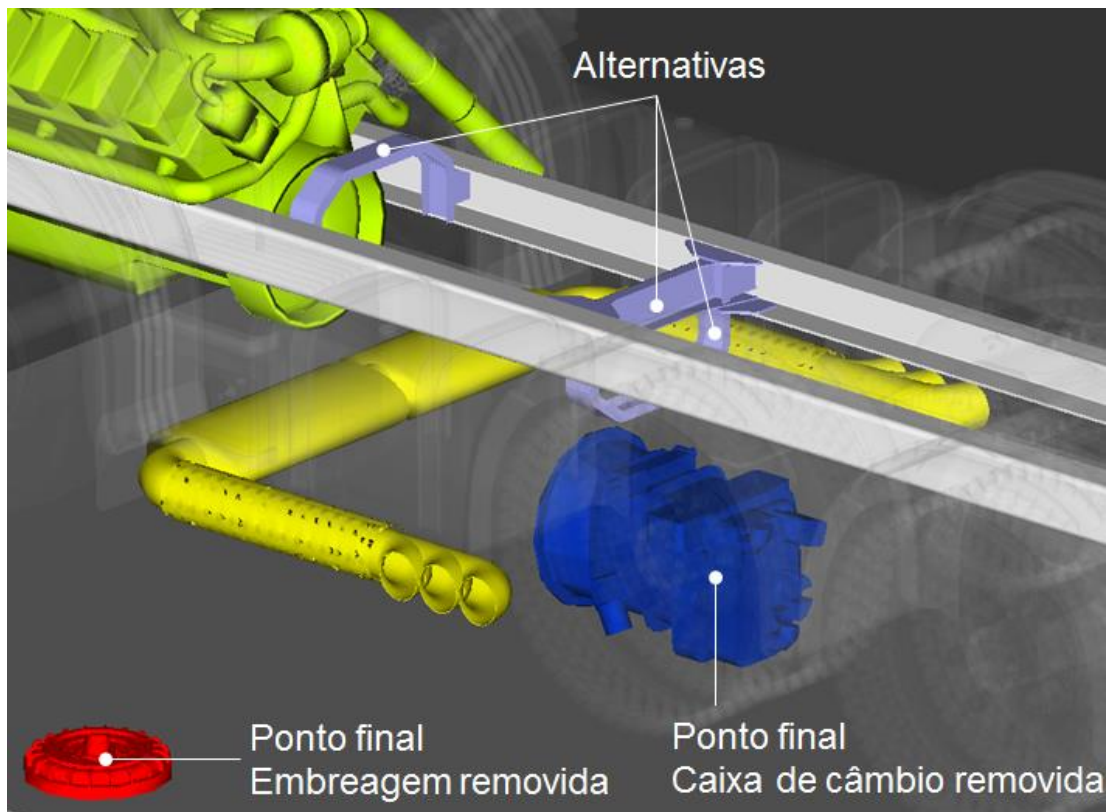


Figura 67 – Ponto final (após desmontagem) para a caixa de transmissão e para a embreagem

A seguir, estão apresentados os resultados obtidos para o estudo de rotas de manutenção levando-se em consideração as alternativas 01, 02 e 03.

Alternativa 01

Possuiu a mais simples rota de manutenção para a remoção da caixa de transmissão das três alternativas analisadas. Percebe-se isso facilmente com a análise do volume de varredura originado pela trajetória descrita pelo componente

⁵ Para este trabalho o estudo foi realizado com a versão educacional do *IPS – Industrial Path Solution Software*. Versão 2.5.6.

no espaço tridimensional (Figura 68). O fato dessa alternativa apresentar a rota mais simples do ponto de vista visual, não a elegeu como sendo a escolhida, e sim, classificou a alternativa para ser submetida aos próximos passos da análise.

Outro ponto observado é que nenhum outro componente que não pertence ao sistema de transmissão do veículo necessitou ser removido, não inserindo possíveis falhas ocultas em outros sistemas como fruto dessa atividade de manutenção.

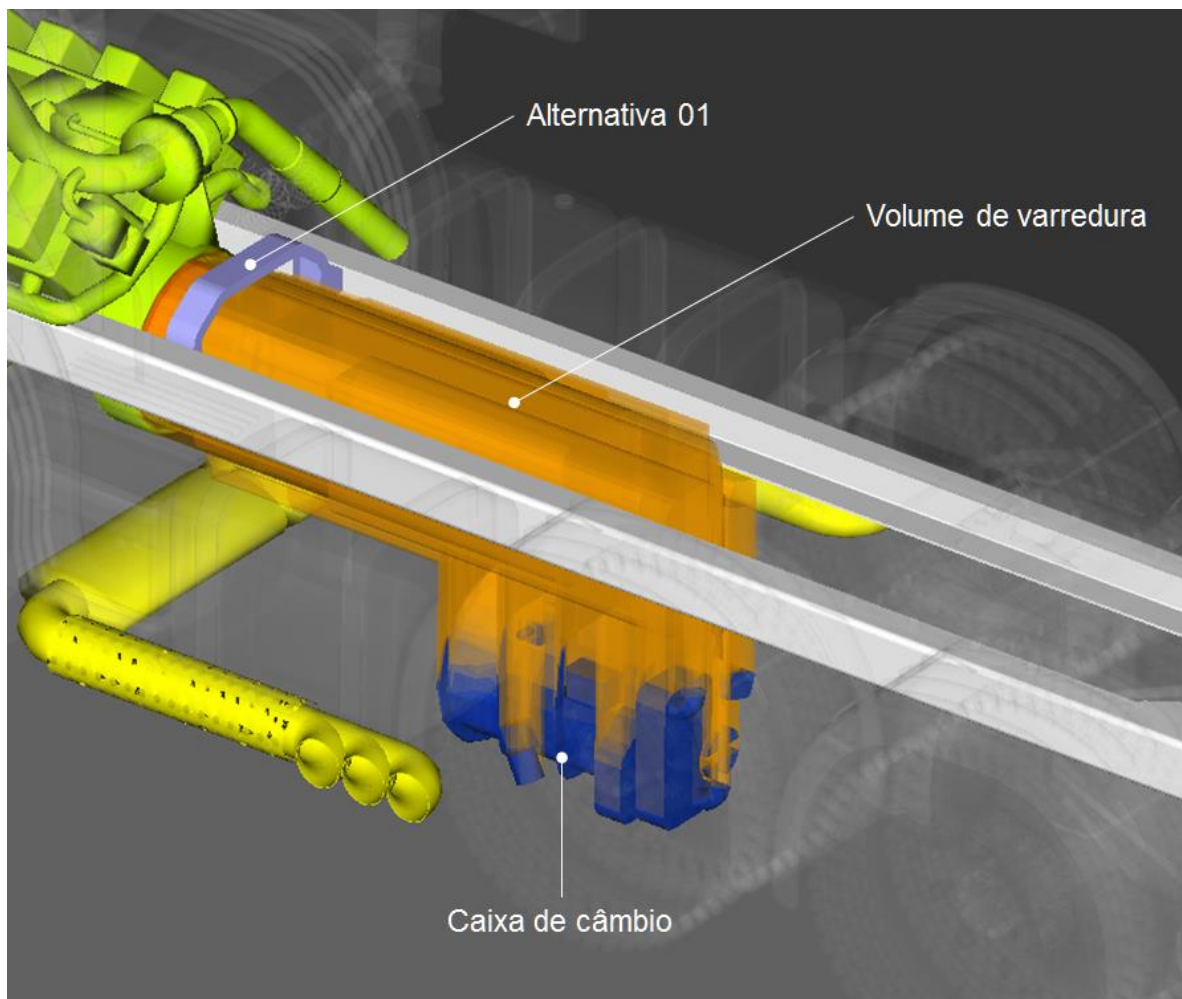


Figura 68 – Volume de varredura originado pela caixa de transmissão (Alternativa 01)

Alternativa 02

Possibilitou uma rota de manutenção aceitável quando considerado o peso e volume do componente (caixa de transmissão). Isto pode ser observado através do volume de varredura apresentado na Figura 69. Por apresentar uma possível rota de manutenção, esta alternativa também foi classificada para ser submetida aos próximos passos da análise.

Da mesma forma que na Alternativa 01, esta alternativa não demandou a remoção de nenhum outro componente que não pertence ao sistema de transmissão do veículo.

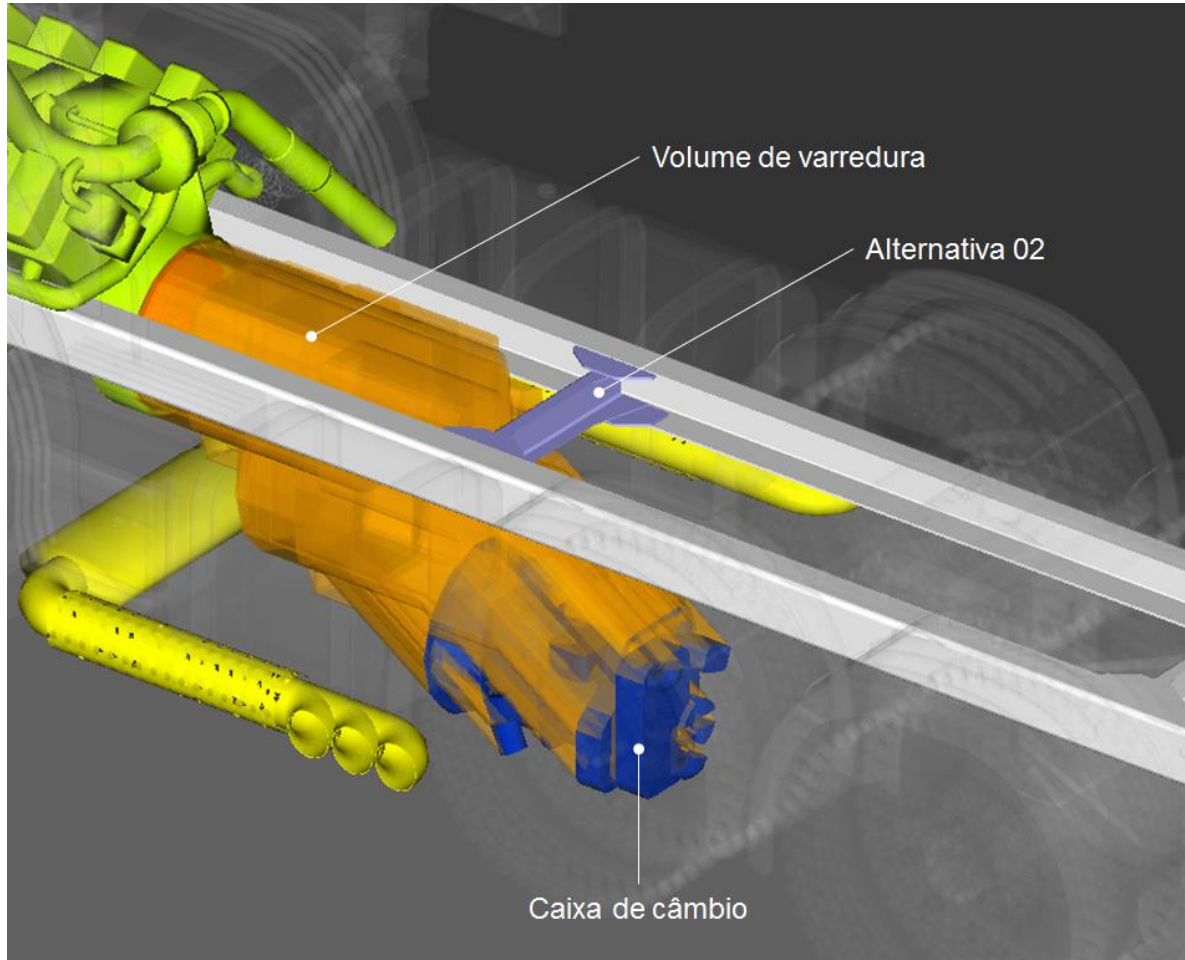


Figura 69 – Volume de varredura originado pela caixa de transmissão (Alternativa 02)

Alternativa 03

Devido a uma colisão (Figura 70) com o sistema de exaustão do veículo (escapamento), o sistema de exaustão teve que ser removido (Figura 71), possibilitando assim a obtenção de uma rota de manutenção aceitável para a caixa de transmissão (Figura 72). O fato de esta alternativa ter demandado a remoção de um componente não pertencente ao sistema de transmissão, não a desclassificou para prosseguir os próximos passos da análise, visto que o fator de aprovação determinante está baseado na obtenção ou não de uma rota de manutenção, que foi

obtida. No entanto, esse aspecto indesejado foi contemplado nas etapas seguintes da análise.

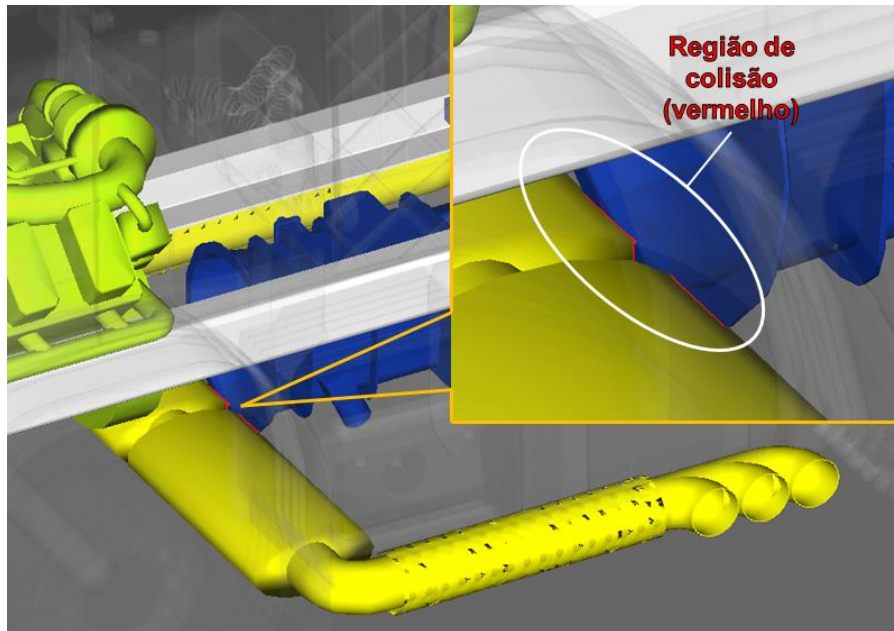


Figura 70 – Colisão encontrada entre o sistema de exaustão (escapamento) e a caixa de transmissão (Alternativa 03)

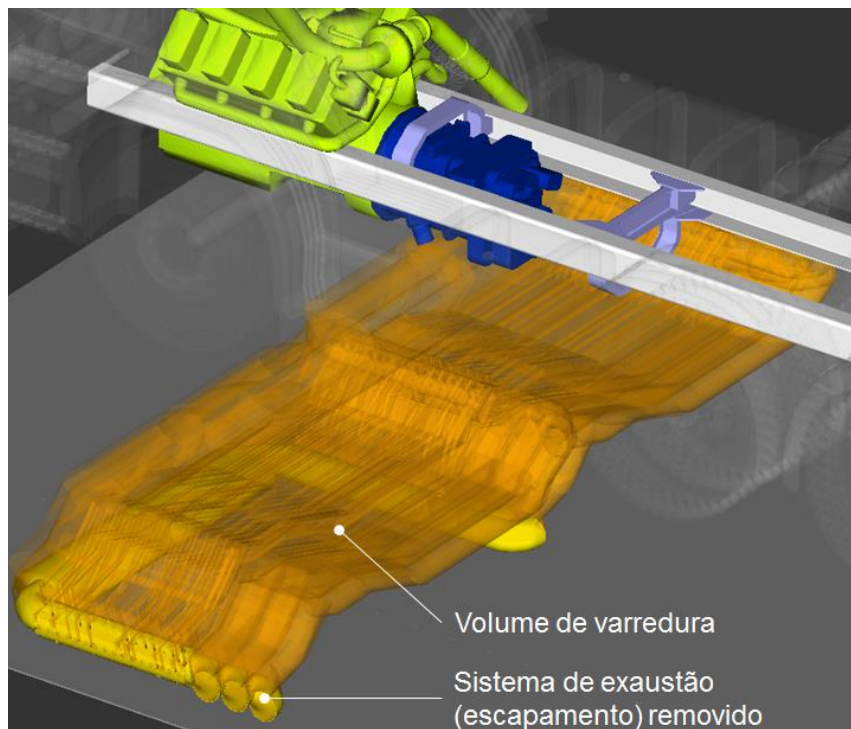


Figura 71 – Remoção do sistema de exaustão (escapamento)

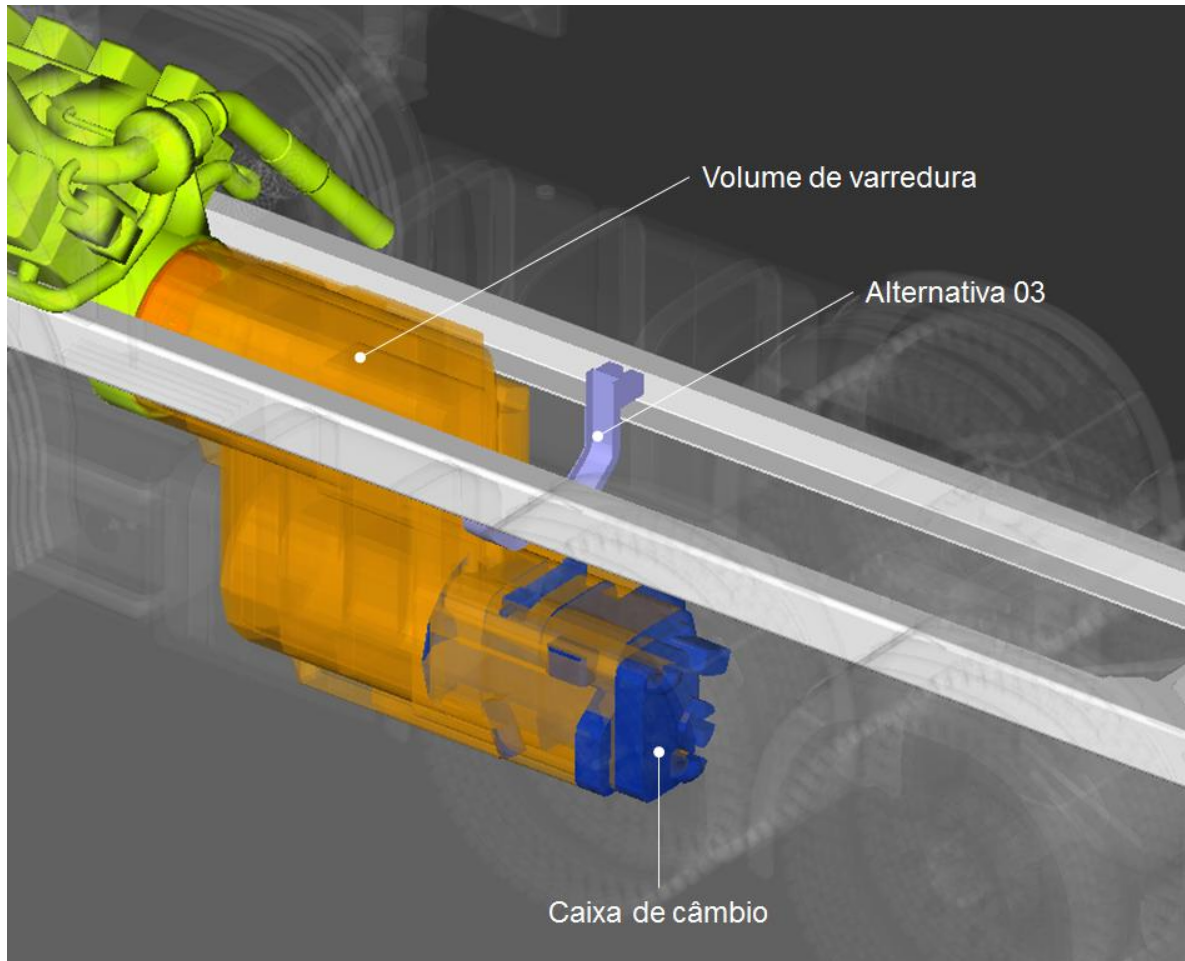


Figura 72 – Volume de varredura originado pela caixa de transmissão (Alternativa 03)

E por fim, a rota de manutenção obtida para a embreagem não apresentou nenhum impeditivo (Figura 73), sendo a mesma rota para as três alternativas e não demandando a remoção de nenhum outro componente que não pertencia ao sistema de transmissão do veículo.

Observa-se com os resultados apresentados, que as três alternativas elencadas para análise, conforme recomendado na Etapa 1 do método proposto na seção 3.2, apresentaram uma rota de saída (desmontagem), possibilitando, portanto, o avanço para a terceira e última etapa.

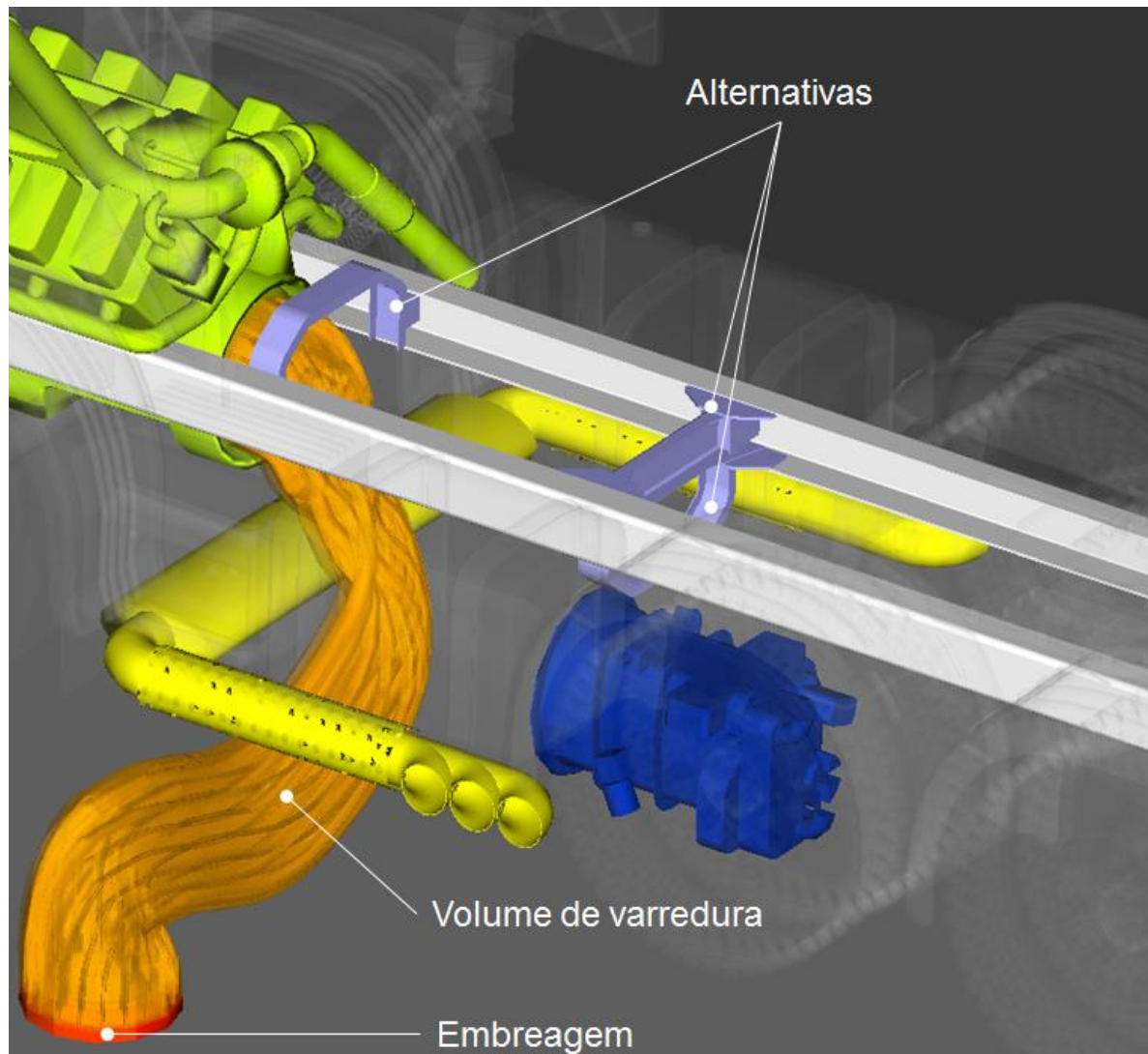


Figura 73 – Volume de varredura originado pela embreagem (Alternativas 01, 02 e 03)

4.1.2.3 Etapa 3: Ordenamento das alternativas

O primeiro passo para obter-se o ordenamento das alternativas foi a avaliação da hierarquia de RBMs proposta na Figura 48. Esta avaliação foi conduzida pelo membro da equipe de projeto que detêm os conhecimentos de manutenibilidade. O resultado obtido pode ser observado na Figura 74.

Como nesta análise se estava avaliando a desmontagem, troca e montagem da embreagem devido à alteração do conceito de reforço do chassi, algumas regras ou grupos completos foram eliminados. O critério utilizado para julgamento de cada uma dos itens está apresentado no Quadro 2.

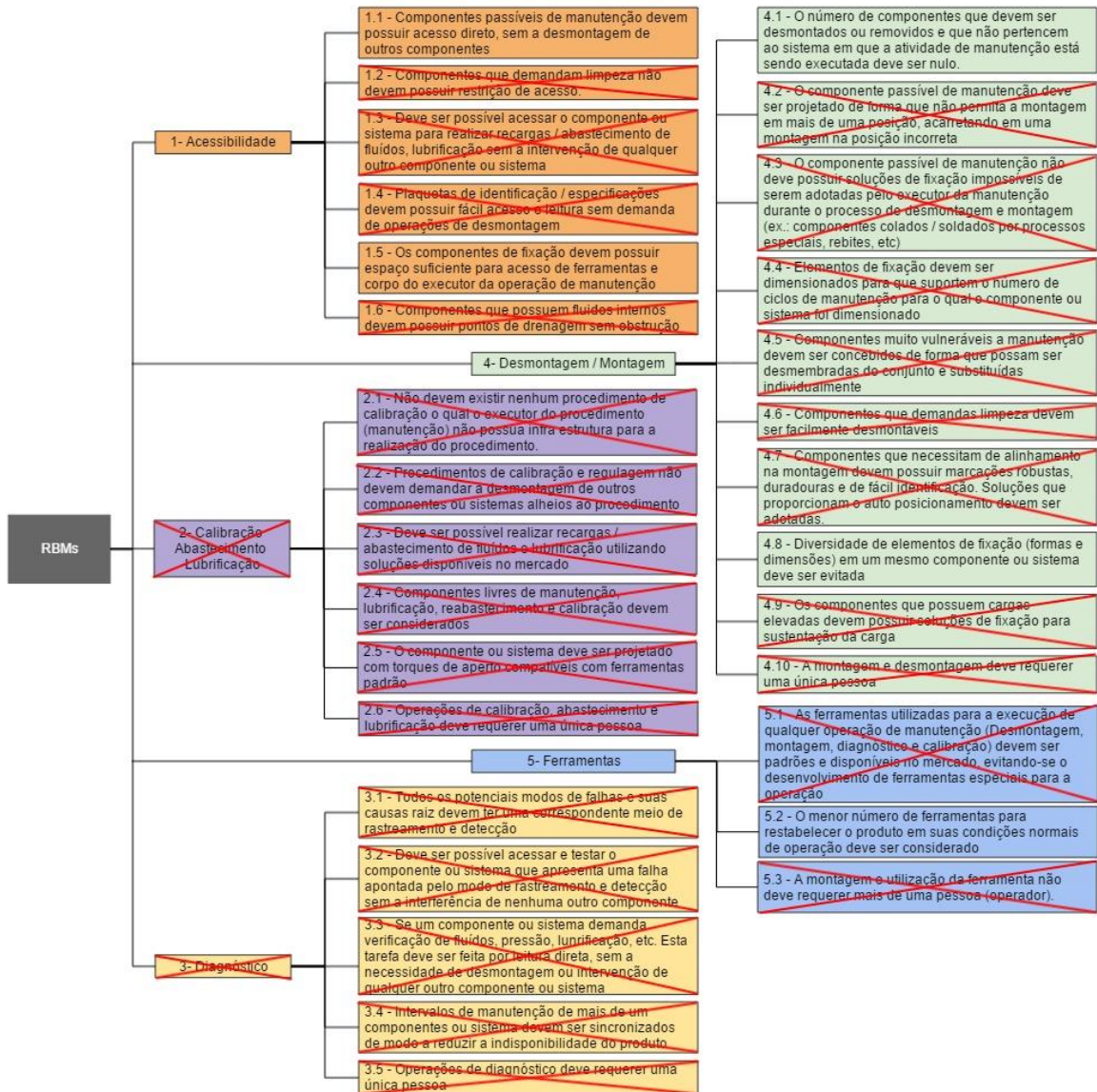


Figura 74 – RBMs aplicáveis na análise de manutenibilidade de troca de sistemas de embreagem

Quadro 2 - Critérios de julgamento dos itens de RBMs durante a aplicação do método

(continua)

Grupo de RBM	RBM	Selecionada? (Sim / Não)	Observações
1 - Acessibilidade	1.1 - Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes	Sim	O acesso foi modificado pelos conceitos propostos e deve ser avaliado
	1.2 - Componentes que demandam limpeza não devem possuir restrição de acesso.	Não	Nenhuma operação de limpeza é demandada
	1.3 - Deve ser possível acessar o componente ou sistema para realizar recargas / abastecimento de fluidos, lubrificação sem a intervenção de qualquer outro componente ou sistema	Não	Apenas a caixa de transmissão demanda troca de óleo, porém a caixa de transmissão não é alvo desta análise e o acesso à troca de óleo não é afetado
	1.4 - Plaquetas de identificação / especificações devem possuir fácil acesso e leitura sem demanda de operações de desmontagem	Não	Sem necessidade de leituras de plaquetas de identificação

Quadro 2 – Critérios de julgamento dos itens de RBMs durante a aplicação do método

(continua)

Grupo de RBM	RBM	Selecionada? (Sim / Não)	Observações
	1.6 - Componentes que possuem fluidos internos devem possuir pontos de drenagem sem obstrução	Não	Apenas a caixa de transmissão demanda drenagem de óleo, porém a caixa de transmissão não é alvo desta análise e o acesso à drenagem de óleo não é afetado
2 – Calibração / Abastecimento / Lubrificação	2.1 - Não deve existir nenhum procedimento de calibração o qual o executor do procedimento (manutenção) não possua infraestrutura para a realização do procedimento.	Não	Calibrações não são exigidas / afetadas
	2.2 - Procedimentos de calibração e regulagem não devem demandar a desmontagem de outros componentes ou sistemas alheios ao procedimento	Não	Calibrações não são exigidas / afetadas
	2.3 - Deve ser possível realizar recargas / abastecimento de fluidos e lubrificação utilizando soluções disponíveis no mercado	Não	Apenas a caixa de transmissão demanda troca de óleo, porém a caixa de transmissão não é alvo desta análise e a solução de troca de óleo não é afetada
	2.4 - Componentes livres de manutenção, lubrificação, reabastecimento e calibração devem ser considerados	Não	Não aplicável para esta análise
	2.5 - O componente ou sistema deve ser projetado com torques de aperto compatíveis com ferramentas padrão	Não	Elementos de fixação de caixa de transmissão e embreagem não sofrem alterações devido aos conceitos
	2.6 - Operações de calibração, abastecimento e lubrificação deve requerer uma única pessoa	Não	Apenas a caixa de transmissão demanda troca de óleo, porém a caixa de transmissão não é alvo desta análise e a solução de troca de óleo não é afetada
3 – Diagnóstico	3.1 - Todos os potenciais modos de falhas e suas causas raiz devem ter uma correspondente meio de rastreamento e detecção	Não	A estratégia de diagnóstico da caixa de transmissão e da embreagem não é afetada pelos conceitos
	3.2 - Deve ser possível acessar e testar o componente ou sistema que apresenta uma falha apontada pelo modo de rastreamento e detecção sem a interferência de nenhuma outro componente	Não	O acesso ao diagnóstico de diagnóstico da caixa de transmissão e da embreagem não é afetado pelos conceitos
	3.3 - Se um componente ou sistema demanda verificação de fluidos, pressão, lubrificação, etc. Esta tarefa deve ser feita por leitura direta, sem a necessidade de desmontagem ou intervenção de qualquer outro componente ou sistema	Não	Apenas a caixa de transmissão demanda verificação de fluido (óleo), porém a caixa de transmissão não é alvo desta análise e a solução de verificação do nível de fluido não é afetada
	3.4 - Intervalos de manutenção de mais de um componente ou sistema devem ser sincronizados de modo a reduzir a indisponibilidade do produto	Não	Intervalos de manutenção não são afetados pelos conceitos
	3.5 - Operações de diagnóstico deve requerer uma única pessoa	Não	A estratégia de diagnóstico da caixa de transmissão e da embreagem não é afetada pelos conceitos
4 – Desmontagem / Montagem	4.1 - O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.	Sim	Existiu a necessidade de desmontagem do sistema de exaustão do veículo (escapamento), pois não houve espaço suficiente para remoção e instalação da caixa de transmissão no veículo em um dos conceitos avaliados
	4.2 - O componente passível de manutenção deve ser projetado de forma que não permita a montagem em mais de uma posição, acarretando em uma montagem na posição incorreta	Não	Os sistemas de fixação e montagem da caixa de transmissão e embreagem não sofrem alterações pelos conceitos propostos
	4.3 - O componente passível de manutenção não deve possuir soluções de fixação impossíveis de serem adotadas pelo executor da manutenção durante o processo de desmontagem e montagem (ex.: componentes colados / soldados por processos especiais, rebites, etc.)	Não	Os sistemas de fixação e montagem da caixa de transmissão e embreagem não sofrem alterações pelos conceitos propostos

Quadro 2 – Critérios de julgamento dos itens de RBMs durante a aplicação do método (conclusão)

Grupo de RBM	RBM	Selecionada? (Sim / Não)	Observações
4 – Desmontagem / Montagem	4.4 - Elementos de fixação devem ser dimensionados para que suportem o número de ciclos de manutenção para o qual o componente ou sistema foi dimensionado	Não	Os sistemas de fixação e montagem da caixa de transmissão e embreagem não sofrem alterações pelos conceitos propostos
	4.5 - Componentes muito vulneráveis a manutenção devem ser concebidos de forma que possam ser desmembrados do conjunto e substituídos individualmente	Não	O desmembramento dos conjuntos embreagem e caixa de transmissão não são afetados pelos conceitos propostos
	4.6 - Componentes que demandam limpeza devem ser facilmente desmontáveis	Não	Não aplicável
	4.7 - Componentes que necessitam de alinhamento na montagem devem possuir marcações robustas, duradouras e de fácil identificação. Soluções que proporcionam o auto posicionamento devem ser adotadas.	Não	Os sistemas de alinhamento e montagem da caixa de transmissão e embreagem não sofrem alterações pelos conceitos propostos
	4.8 - Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada	Sim	Foi acrescentada diversidade de elementos de fixação devido a remoção do sistema de exaustão do veículo (escapamento), para um dos conceitos
	4.9 - Os componentes que possuem cargas elevadas devem possuir soluções de fixação para sustentação da carga	Não	Os pontos de ancoragem da caixa de transmissão e da embreagem permanecem os mesmos
	4.10 - A montagem e desmontagem deve requerer uma única pessoa	Não	Não foi identificada a necessidade de mais pessoas
5 - Ferramentas	5.1 - As ferramentas utilizadas para a execução de qualquer operação de manutenção (Desmontagem, montagem, diagnóstico e calibração) devem ser padrões e disponíveis no mercado, evitando-se o desenvolvimento de ferramentas especiais para a operação	Não	Nenhuma ferramenta nova foi desenvolvida
	5.2 - O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado	Sim	Houve alteração da quantidade de ferramentas necessárias devido à remoção do sistema de exaustão do veículo (escapamento)
	5.3 - A montagem e utilização da ferramenta não devem requerer mais de uma pessoa (operador).	Não	Não foi identificada a necessidade de mais pessoas

Como demonstrado da seção 2.5.1.3 até a seção 2.5.1.6, após a definição de quais critérios de RBMs seriam utilizados para o ordenamento das alternativas, o próximo passo foi a elaboração das matrizes de comparação e seus julgamentos, tendo o índice e a razão de consistência como fatores determinantes da coerência dos dados obtidos no julgamento. Isso permitiu o estabelecimento das prioridades locais e globais, o resultado obtido para cada um dos grupos selecionados e, seus respectivos itens de RBMs aplicáveis na análise de manutenibilidade da troca de sistemas de embreagem, conforme demonstrado na Figura 75. O julgamento foi realizado com a participação do projetista responsável pelo conceito proposto e o engenheiro de serviço responsável pelos requisitos de manutenibilidade no projeto.

As matrizes de comparação obtidas para os grupos de RBMs estão apresentadas no APÊNDICE C.

RBM s		
1 - Acessibilidade		0.44
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes	0.75	0.33
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção	0.25	0.11
4 - Desmontagem / Montagem		0.48
4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.	0.88	0.42
4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada	0.13	0.06
5 - Ferramentas		0.08
5.2- O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado	1.00	0.08

Figura 75 – Prioridades locais e globais para RBMs aplicadas na análise de manutenibilidade da troca de sistemas de embreagem

Com a árvore estruturada e as prioridades dos critérios de RBMs estabelecidas foi possível determinar de forma similar, como cada uma das alternativas propostas contemplou as RBMs. O cruzamento entre todas as avaliações das alternativas em todos os critérios determinou o valor final de cada uma das alternativas em relação à manutenibilidade. Os valores obtidos estão demonstrados na Tabela 6.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE

Observou-se que um dos fatores mais impactantes na remoção e troca da embreagem foi a movimentação da caixa de transmissão. Esta possuiu sua remoção influenciada pela posição de diversos componentes instalados no veículo. Neste caso, em específico, foram analisados os reforços do chassi.

Analisando-se os resultados obtidos na Tabela 6, foi possível plotar os percentuais (Figura 76) de priorização das três alternativas quando submetidas às RBMs.

Tabela 6 – Valores utilizados para definição das prioridades entre as três alternativas analisadas na manutenibilidade de sistemas de embreagem

	Peso do Critério	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.
1 - Acessibilidade							
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes	0.33	0.45	0.15	0.45	0.15	0.09	0.03
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção	0.11	0.14	0.02	0.43	0.05	0.43	0.05
4 - Desmontagem / Montagem							
4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.	0.42	0.47	0.20	0.47	0.20	0.07	0.03
4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada	0.06	0.43	0.03	0.43	0.03	0.14	0.01
5 - Ferramentas							
5.2- O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado	0.08	0.43	0.03	0.43	0.03	0.14	0.01
Resultados			0.42		0.45		0.13

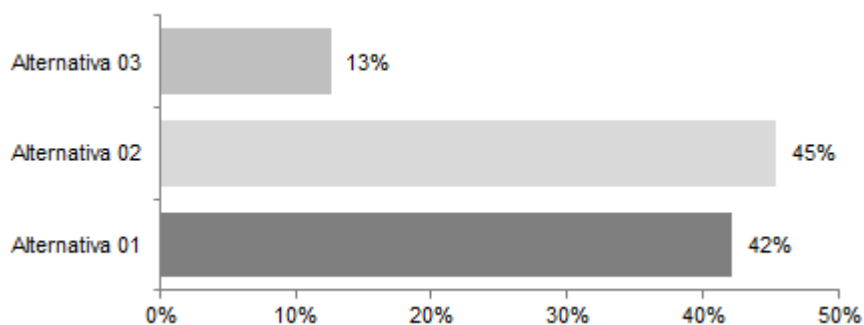


Figura 76 – Percentuais de priorização das três alternativas analisadas na manutenibilidade de sistemas de embreagem

Pela Figura 76, a alternativa que apresentou maior aderência ao conjunto de RBMs foi a Alternativa 2. Ela contribui em 45% (0,45) no quesito manutenibilidade contra 42% (0,42) e 13% (0,13) das Alternativas 1 e 3, respectivamente. Portanto, a alternativa selecionada do ponto de vista de atendimento a RBMs, considerando a operação de substituição da embreagem foi a Alternativa 2.

As matrizes de comparação para as alternativas estão contidas no APÊNDICE D.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A ANÁLISE

Com base nos resultados obtidos, não somente a escolha da Alternativa 2 pôde ser realizada mas, também, uma análise mais detalhada de quais fatores tornaram as alternativas não escolhidas menos competitivas. Na Tabela 7 pode-se ver uma comparação entre as alternativas 1 e 2. Com a análise dos valores que compõe o peso final, percebe-se que a Alternativa 01 foi apenas menos competitiva no que tange à acessibilidade das ferramentas e do corpo do executor aos componentes de fixação (Figura 77), sendo que a equipe de projeto pode trabalhar na melhoria deste quesito caso esta alternativa seja a mais viável do ponto de vista do projeto como um todo. Após o retrabalho da Alternativa 1 a avaliação deve ser conduzida novamente.

Tabela 7 – Comparação entre os valores obtidos para as alternativas 01 e 02

	Peso do Critério	Alternativa 1		Alternativa 2	
		Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.
1 - Acessibilidade					
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes	0.33	0.45	0.15	0.45	0.15
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção	0.11	0.14	0.02	0.43	0.05
4 - Desmontagem / Montagem					
4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.	0.42	0.47	0.20	0.47	0.20
4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada	0.06	0.43	0.03	0.43	0.03
5 - Ferramentas					
5.2- O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado	0.08	0.43	0.03	0.43	0.03
Resultados			0.42		0.45

Na Tabela 8, pode-se perceber que a Alternativa 3 foi muito penalizada pelo fato de exigir a remoção do sistema de exaustão do veículo (escapamento),

conforme já mostrado na Figura 71. Este tipo de remoção gerou penalidades no grupo “Acessibilidade”, pois componentes de manutenção deviam possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes que não estão relacionados à aquele sistema (transmissão). Já no grupo “Desmontagem / Montagem”, a Alternativa 3 também foi penalizada pois o número de componentes pertencentes a outro sistema e que deviam ser desmontados deveria ser nulo. Isto também acrescentou uma diversidade de componentes de fixação. E por fim, no grupo “Ferramentas”, a Alternativa 3 foi penalizada devido ao aumento do número de ferramentas, pois mais ferramentas distintas foram necessárias para a remoção do sistema de exaustão (escapamento).

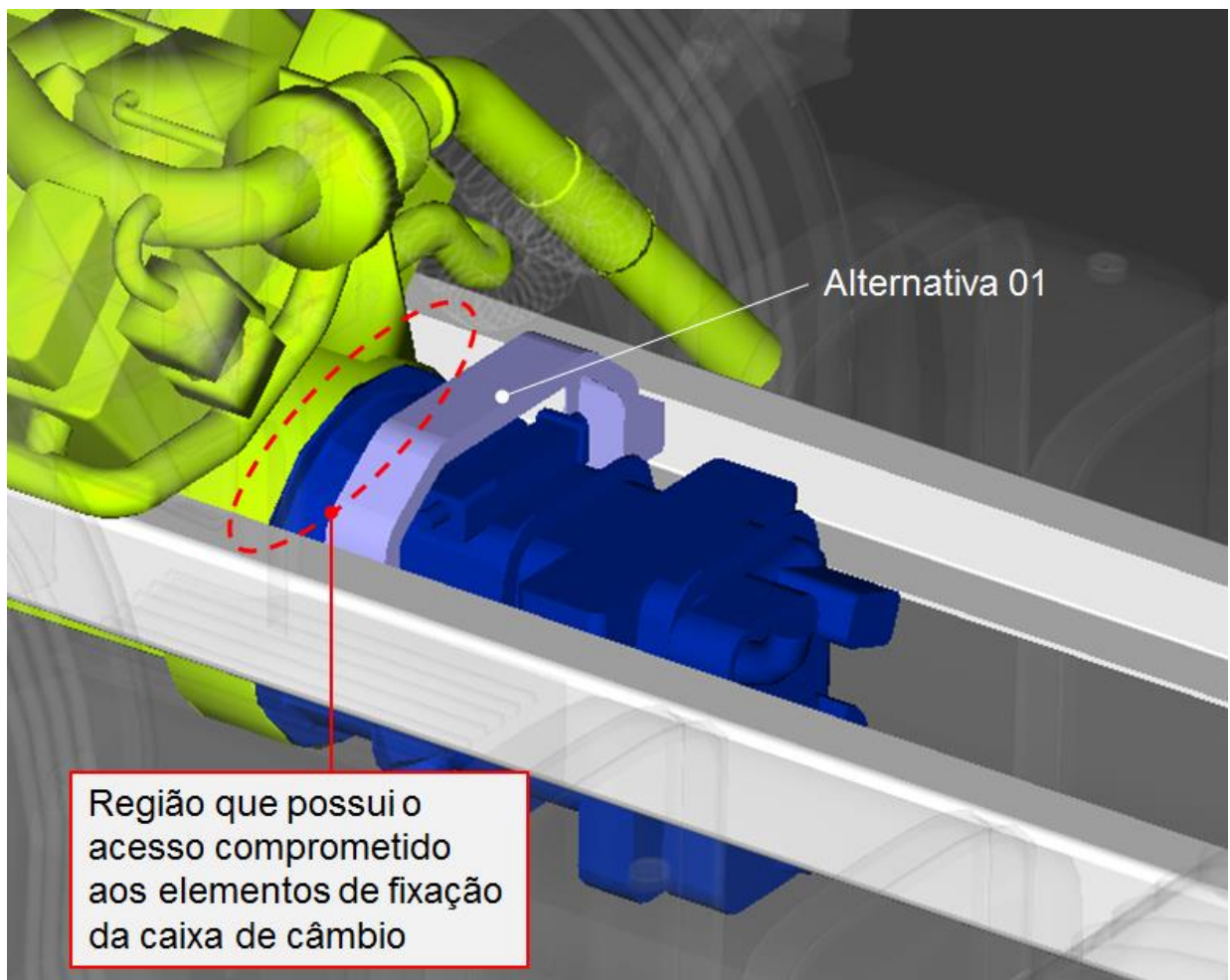


Figura 77 – Região que possui o acesso comprometido aos elementos de fixação para a Alternativa 01

Tabela 8 – Comparação entre os valores obtidos para as alternativas 02 e 03

	Peso do Critério	Alternativa 2		Alternativa 3	
		Peso alt.	Prod.	Peso alt.	Prod.
1 - Acessibilidade					
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes	0.33	0.45	0.15	0.09	0.03
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção	0.11	0.43	0.05	0.43	0.05
4 - Desmontagem / Montagem					
4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.	0.42	0.47	0.20	0.07	0.03
4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada	0.06	0.43	0.03	0.14	0.01
5 - Ferramentas					
5.2- O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado	0.08	0.43	0.03	0.14	0.01
Resultados			0.45		0.13

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O presente estudo possibilitou um melhor entendimento de como a manutenibilidade pode ser endereçada nas fases iniciais do processo de desenvolvimento de produto. Sistematizar o processo de alocação de requisitos de manutenibilidade desde as fases iniciais de desenvolvimento, dando um subsídio mais robusto e mensurável de avaliação destes requisitos (quando traduzidos em conceitos), significa estar atento ao desenvolvimento de produtos com grandes potenciais lucrativos no mercado de pós-vendas. Isto aumenta a disponibilidade do produto e fideliza clientes para futuras compras. Ou seja, este trabalho reforça a ideia de que manutenibilidade não deve ser resultado do mero acaso, tentando-se extrair o melhor e adaptando o parâmetro ao produto assim que desenvolvido. Deve sim, estar prevista e fazer parte do escopo do projeto desde as fases iniciais, seja para projetos que almejam desenvolver soluções integralmente novas, ou aqueles que buscam melhorias e atualizações de produtos.

O objetivo desse trabalho foi atingido através da proposta de um método, que demonstrou ser possível acoplar ferramentas CAD com a ferramenta de análise de rotas de desmontagem de conjuntos, e subsequente emprego de regras chaves de manutenção, subsidiando o engenheiro de serviço juntamente com os demais membros do time de projeto na avaliação e seleção, durante o PDP, de conceitos que melhor suportem diretrizes de manutenibilidade, através do emprego de uma técnica de hierarquização. A utilização de ferramentas CAD e de estudo de rotas de saída, são práticas existentes, porém ainda pouco exploradas no estudo de manutenibilidade, e quando integradas a uma técnica de hierarquização que subsidie os resultados obtidos de forma quantitativa, contribui para a eliminação da subjetividade na avaliação de requisitos de manutenibilidade em projetos, torna esse método aplicável à rotina de desenvolvimento de produtos e, reforça a ideia de que manutenibilidade ainda é precariamente endereçada durante as fases de projeto.

A aplicação do método pode ser considerada simples, sendo que o conhecimento para emprego do mesmo pode ser transferido a outros membros do time através de um treinamento básico. O tempo para emprego do método pôde ser considerado satisfatório, pois, apesar do mesmo requerer a utilização de técnica de

decisão, este processo não se torna excessivamente demorado, pois um conjunto máximo de itens a serem comparados é proposto neste trabalho. Para o emprego do método durante a aplicação demonstrativa, foram investidas em torno de quatro horas, utilizadas por dois recursos, um valor aceitável se comparado às demais análises e técnicas que devem ser empregadas por outras áreas também envolvidas durante o PDP.

O fato de haver, durante o processo de projeto, uma etapa que avaliará concepções sob o foco da manutenibilidade, permite que a equipe de projeto tenha uma postura que contemple a geração de alternativas distintas que apresentem elementos que diferenciem o novo produto dos produtos existentes.

O resultado apresentado foi obtido mediante a correlação teórico – prática. A teoria disponibiliza muitas informações. Porém, desconectas e, muitas vezes, não atreladas especificamente ao assunto manutenibilidade. A partir do relacionamento das informações obtidas na teoria, foi possível propor uma definição própria para manutenibilidade. A observação do comportamento dos itens referentes à manutenibilidade na prática, e as tentativas, muitas vezes, frustradas de extrair o máximo em manutenibilidade após a concepção e produção do produto, contribuiu para a determinação de critérios simples e resumidos, mas que, se endereçados em estágios iniciais trazem benefícios concretos.

O caso utilizado para aplicação demonstrativa possibilitou comprovar que o estudo de manutenibilidade é muito mais amplo que o foco em um único componente. Este estudo pode envolver um componente único, mas também, um conjunto complexo (produto completo) onde o componente será aplicado. Como exemplo disso, a aplicação demonstrativa desse trabalho teve a operação de troca de uma embreagem como objeto de estudo, componente este, que em um veículo específico (conjunto) pode atender completamente requisitos de manutenibilidade. Porém, esta mesma embreagem quando montada em um veículo diferente, que apresente de forma distinta uma distribuição e montagem dos demais componentes, pode obter resultados desastrosos, reforçando desta maneira que manutenibilidade é uma etapa do desenvolvimento de produto que deve ser sempre considerada.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta seção visa destacar pontos a serem aprimorados no método sugerido em possíveis investigações futuras.

Propor a separação de hierarquias das Regras Básicas de Manutenibilidade – RBMs que são aplicáveis a conjuntos e a componentes, otimizando desta maneira o tempo gasto na análise de manutenibilidade dependendo do conceito em questão. As RBMs sugeridas tanto para componentes isolados como para conjuntos aparecem juntas na hierarquia proposta neste trabalho.

Propor a aplicação do método em outros segmentos da indústria, visando à validação das hierarquias de Regras Básicas de Manutenibilidade – RBMs. As RBMs são fruto da coleta de informações teóricas e de campo, oriunda da vivência prática na indústria automobilística.

Correlacionar o tempo padrão para a realização de operações de manutenção com o método proposto, reforçando ainda mais o endereçamento de requisitos robustos e mensuráveis desde as fases iniciais do processo de desenvolvimento do produto. O tempo necessário para se realizar uma tarefa de manutenção não foi abordado no método proposto. Apesar do tempo padrão para a realização de operações específicas ser abordado em muitas bibliografias, o autor deste trabalho entende que quando a manutenibilidade é vista, única e exclusivamente, sob o aspecto de tempo, outras regras podem ser negligenciadas, como a remoção de componentes que não são ligados diretamente ao sub sistema que se deseja manter, situação essa vivenciada na validação deste método. Porém, o autor entende também que o tempo é um dos fatores determinantes do sucesso de uma operação de manutenção.

REFERÊNCIAS

- ABBATIELLO, N. **Development of a Design for Service Strategy**. Dissertação (mestrado) – University of Rhode Island. United States, 1995.
- BHUSHAN, N.; RAI, K. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. New York: Springer, 2004.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J., **System Engineering and Analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 2006.
- BLANCHARD, B. S.; VERMA, D.; PETERSON, E. L. **Maintainability: A Key To Effective Serviceability And Maintenance Management**. New York: John Wiley & Sons, INC, 1995.
- BOOTHROYD, G. **Design for Assembly – A Designer’s Handbook**, Amherst: Department of Mechanical Engineering of University of Massachusetts, 1980.
- CATIA: Catia Composer. 2015. Disponível em: <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/composer/portfolio/composer/>. Acesso em: 05 Mar. 2015.
- CHAN, A. H. S.; KWOK W.Y.; DUFFY V. G. **Using AHP for determining priority in a safety management system**. **Industrial Management & Data Systems**, Volume 104, 5: 430–445, 2004.
- CHANG, H.; LI, T. Assembly Maintainability Study With Motion Planning. **Robotics and Automation**, Nagoya, v. 1. 1995. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=525415&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D525415. Acesso em: 05 Mar. 2015.
- COULIBALY, A.; HOUSSIN, R.; MUTEL, B. Maintainability and safety indicators at design stage for mechanical products. **Journal Computers in Industry**, 59, p. 438-449, 2008.

DEWHURST, P.; ABBATIELLO, N. **Design for X: Concurrent Engineering Imperatives**. London: Chapman & Hall, 1996.

DISTRIBUTION OF 3D VISUALISATION DATA FOR AFTERMARKET. Figura sobre a rota de saída de um compressor. 2009. Disponível em: http://www.prostep.org/fileadmin/user_upload/ProSTEPiViP/Events/Symposium-2007/Programm/26_1000a_Brorson-Zimmerman.pdf. Acesso em: 17 Jun. 2009.

FERRAMENTA PARA REMOÇÃO DE CAIXA DE TRANSMISSÃO WEBERUK. 2015. Disponível em: <http://www.weberuk.com/shop/trolley-type-transmission-jacks-%7C263/whtj1000/>. Acesso em: 01 Jul. 2015.

GRANDZOL, J. R. Improving the Faculty Selection Process in Higher Education: A Case for the Analytic Hierarchy Process. **Association for Institutional Research**, Tallahassee, 24 ago. 2005. Disponível em: <http://eric.ed.gov/?id=ED504373>. Acesso em: 02 Nov. 2014.

IPS. **Basic Training**. Chalmers: Chalmers University, 2011.

IPS – Industrial Path Solution Software. Version 2.5.6. Sweden: Chalmers Research Centre Industrial Mathematics, 2015.

IPS: IPS PATH PLANNER. 2015. Disponível em: <http://www.fcc.chalmers.se/software/ips/ips-path-planner/>. Acesso em: 20 mai. 2015.

KOSTLAN, E. Statistical Complexity of Dominant Eigenvector Calculation. **University of Hawaii**, Honolulu, 12 jul. 1990. Disponível em: <http://www.developmentserver.com/randompolynomials/scdec/paper.pdf>. Acesso em: 03 Mar. 2015.

VOLVO TRUCKS IMAGE GALLERY. 2014. Disponível em: http://www.xmarks.com/site/reviews/date/1/icp.llr.se/CumulusE_Z/VTC_ImageGallery/WebUsers.jsp. Acesso em: 17 Mar. 2014.

MEGHERBI, B. D.; MALAYIA, V. Cooperation in a distributed hybrid potential-field/reinforcement learning multi-agents-based autonomous path planning in a dynamic time-varying unstructured environment. **Cognitive Methods in Situation**

Awareness and Decision Support, New Orleans, 2012. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6188413&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6188413. Acesso em: 02 nov. 2014.

MEYER, M. W; **Rethinking performance measurement: beyond the balanced scorecard**. New York: Cambridge University Press, 2002.

MIL-HDBK-470. **Military Standardization Handbook: Designing and Developing Maintainable Products and Systems**, United States: Department of Defense, 1997.

MOSCHETO, A. D.; **Desenvolvimento de um Conjunto de Diretrizes e Ferramenta Computacional para Endereçar o Parâmetro de Mantabilidade no PDP**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

MOSCHETO, A. D.; CZIULIK C.; JUNIOR, S. M.; SULEVIS, M., Análise de reserva de espaço para a manutenção em componentes-chave em bens de capital. **Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos**, Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cbgdp2011/downloads/12835.pdf>. Acesso em 15 Nov. 2014.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. **Projeto na Engenharia** 6 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill International, 1980.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill Pub. Co., 1991.

SAATY, T. L. **How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process**. The Institute for Operations Research and the Management Sciences, Interfaces 24(6), pg. 19-43, USA, 1994.

SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks**. Pittsburgh: RWS Publications, 2005.

SAATY, T. L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process. **Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, Madrid, 2008. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF03191825>. Acesso em: 03 Mar. 2015.

SILVA, D. M. R. e; **Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, E. L. da; MUSZKAT, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2000.

SLAVILLA, C.; DECREUSE, C.; FERNEY, M., Fuzzy Approach for Maintainability Evaluation in the Design Process. **Université de Technologie de Belfort-Montbéliard**, Belfort Cedex, 2005. Disponível em: <http://cer.sagepub.com/content/13/4/291.short>. Acesso em: 01 Nov. 2014.

SUBRAMANI, A. K.; **Development of a design for service methodology**. Dissertação – University of Rhode Island. United States, 1993.

TAVARES, R. S.; MARTINS, T. C.; TSUZUKI, M. S. G. Simulated annealing with adaptive neighborhood: A case study in off-Line robot path planning. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410008808>. Acesso em: 15 Out. 2014.

TEKNOMO, K. **Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial**, 2006. Disponível em: http://www.thecourse.us/5/Library/AHP/AHP_Tutorial.pdf. Acesso em: 15 Mar. 2015.

TF3DM: 3D Scania Models. 2015. Disponível em: <http://tf3dm.com/3d-models/scania>. Acesso em: 01 Abr. 2015.

TRIANANTAPHYLLOU, E.; MANN S. H. Using The Analytic Hierarchy Process For Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges. **International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice**, Busan, 1995. Disponível em: http://www.csc.lsu.edu/trianta/Journal_PAPERS1/AHPapls1.pdf. Acesso em: 15 Mar. 2015.

VARGAS, R.; **Utilizando a Programação Multicritério (AHP) Para Selecionar e Priorizar Projetos na Gestão de Portfólio**. 2010. Disponível em: <http://www.ricardo-vargas.com/pt/articles/analytic-hierarchy-process/>. Acesso em: 10 Mar. 2015.

VARGAS, L.G. An Overview of the Analytic Hierarchy Process and its Applications. **European Journal of Operational Research**, North-Holland, 1990. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179090056H>. Acesso em: 15 Mar, 2015.

ZIMMERMAN, T.; BERGSJÖ, D.; MALMQVIST, J. Coordinating the engineering and aftermarket disciplines in early phases of product development. **1st Nordic Conference on Product Life Cycle Management**, Gotemburgo, 2006. Disponível em: <http://publications.lib.chalmers.se/publication/69707-coordinating-the-engineering-and-aftermarket-disciplines-in-early-phases-of-product-development>. Acesso em: 15 Oct. 2015.

APÊNDICE A - Matrizes comparativas e os valores obtidos para o Índice e Razão de Consistência dos grupos das RBMs utilizadas na descrição do método

Este apêndice apresenta as matrizes comparativas para os grupos das RBMs e seus respectivos valores obtidos para o Índice e a Razão de Consistência para o conteúdo apresentado na seção 0.

Acessibilidade					
	Item 1.1	Item 1.5	Item 1.6		
Item 1.1	1	1/3	1/2		
Item 1.5	3	1	3		
Item 1.6	2	1/3	1		
Total (Soma)	6.00	1.67	4.50	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Item 1.1	0.17	0.20	0.11	0.16	16%
Item 1.5	0.50	0.60	0.67	0.59	59%
Item 1.6	0.33	0.20	0.22	0.25	25%
Vetor Auto-Vetor	0.16	0.59	0.25		
Total (Soma)	6.00	1.67	4.50		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3.07				
IC	0.04				
RC	0.06	6%			

Items
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção
1.6- Componentes que possuem fluidos internos devem possuir pontos de drenagem sem obstrução

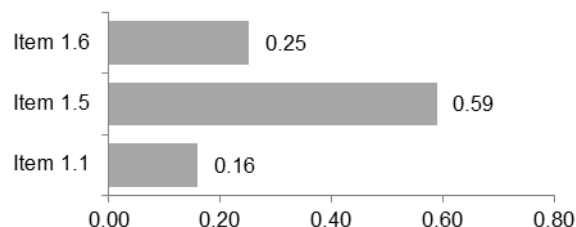


Figura 78 – Matriz comparativa para o grupo acessibilidade utilizada na descrição do método

Calibração					
Abastecimento			Item 2.2	Item 2.4	Item 2.5
Lubrificação					
Item 2.2	1	1/3	1/2		
Item 2.4	3	1	3		
Item 2.5	2	1/3	1		
Total (Soma)	6.00	1.67	4.50	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Item 2.2	0.17	0.20	0.11	0.16	16%
Item 2.4	0.50	0.60	0.67	0.59	59%
Item 2.5	0.33	0.20	0.22	0.25	25%
Auto-Vetor	0.16	0.59	0.25		
Total (Soma)	6.00	1.67	4.50		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3.07				
IC	0.04				
RC	0.06	6%			

Items
2.2- Procedimentos de calibração e regulagem não devem demandar a desmontagem de outros componentes ou sistemas alheios ao procedimento
2.4- Componentes livres de manutenção, lubrificação, reabastecimento e calibração devem ser considerados
2.5- O componente ou sistema deve ser projetado com torques de aperto compatíveis com ferramentas padrão

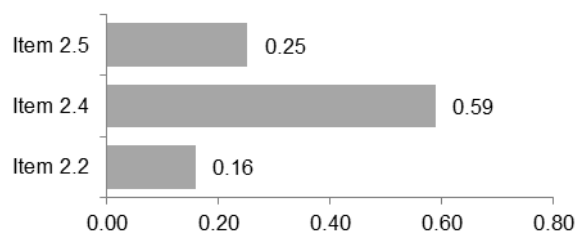


Figura 79 – Matriz comparativa para o grupo calibração, abastecimento e lubrificação utilizada na descrição do método

Diagnóstico	Item 3.1	Item 3.2	Item 3.3	Item 3.4	Item 3.5		
Item 3.1	1	1	1	3	3		
Item 3.2	1	1	1	5	3		
Item 3.3	1	1	1	3	3		
Item 3.4	1/3	1/5	1/3	1	1/3		
Item 3.5	1/3	1/3	1/3	3	1		
Total (Soma)	3.67	3.53	3.67	15.00	10.33	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Item 3.1	0.27	0.28	0.27	0.20	0.29	0.26	26%
Item 3.2	0.27	0.28	0.27	0.33	0.29	0.29	29%
Item 3.3	0.27	0.28	0.27	0.20	0.29	0.26	26%
Item 3.4	0.09	0.06	0.09	0.07	0.03	0.07	7%
Item 3.5	0.09	0.09	0.09	0.20	0.10	0.11	11%
Vetor Auto-Vetor	0.26	0.29	0.26	0.07	0.11		
Total (Soma)	3.67	3.53	3.67	15.00	10.33		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	5.16						
IC	0.04						
RC	0.03	3%					

Items

3.1- Todos os potenciais modos de falhas e suas causas raiz devem ter uma correspondente meio de rastreamento e detecção

3.2- Deve ser possível acessar e testar o componente ou sistema que apresenta uma falha apontada pelo modo de rastreamento e detecção sem a interferência de nenhuma outro componente

3.3- Se um componente ou sistema demanda verificação de fluidos, pressão, lubrificação, etc. Esta tarefa deve ser feita por leitura direta, sem a necessidade de desmontagem ou intervenção de qualquer outro componente ou sistema

3.4- Intervalos de manutenção de mais de um componentes ou sistema devem ser sincronizados de modo a reduzir a indisponibilidade do produto

3.5- Operações de diagnóstico deve requerer uma única pessoa

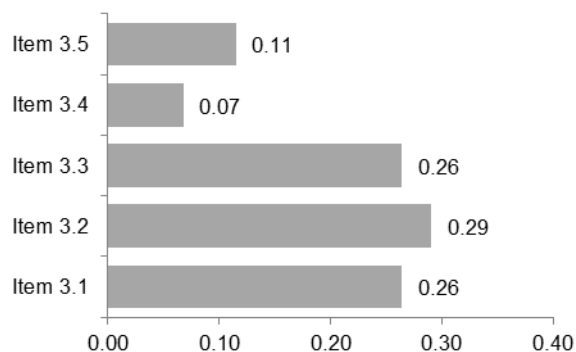


Figura 80 – Matriz comparativa para o grupo diagnóstico utilizada na descrição do método

	Item 4.1	Item 4.2	Item 4.3	Item 4.4	Item 4.5	Item 4.7	Item 4.8	Item 4.10		
Desmontagem										
Montagem										
Item 4.1	1	1/3	1/5	1/5	1/7	1/3	1	1		
Item 4.2	3	1	1/3	1/3	1/7	1	3	1		
Item 4.3	5	3	1	1	1	3	5	3		
Item 4.4	5	3	1	1	1	3	5	5		
Item 4.5	7	7	1	1	1	7	9	5		
Item 4.7	3	1	1/3	1/3	1/7	1	3	3		
Item 4.8	1	1/3	1/5	1/5	1/9	1/3	1	1/3		
Item 4.10	1	1	1/3	1/5	1/5	1/3	3	1		
Total (Soma)	26.00	16.67	4.40	4.27	3.74	16.00	30.00	19.33	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Item 4.1	0.04	0.02	0.05	0.05	0.04	0.02	0.03	0.05	0.04	4%
Item 4.2	0.12	0.06	0.08	0.08	0.04	0.06	0.10	0.05	0.07	7%
Item 4.3	0.19	0.18	0.23	0.23	0.27	0.19	0.17	0.16	0.20	20%
Item 4.4	0.19	0.18	0.23	0.23	0.27	0.19	0.17	0.26	0.21	21%
Item 4.5	0.27	0.42	0.23	0.23	0.27	0.44	0.30	0.26	0.30	30%
Item 4.7	0.12	0.06	0.08	0.08	0.04	0.06	0.10	0.16	0.09	9%
Item 4.8	0.04	0.02	0.05	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	3%
Item 4.10	0.04	0.06	0.08	0.05	0.05	0.02	0.10	0.05	0.06	6%
Vetor Auto-Vetor	0.04	0.07	0.20	0.21	0.30	0.09	0.03	0.06		
Total (Soma)	26.00	16.67	4.40	4.27	3.74	16.00	30.00	19.33		
Auto Valor Máximo (AMáx)	8.49									
IC	0.07									
RC	0.05	5%								

Items

- 4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.
- 4.2- O componente passível de manutenção deve ser projetado de forma que não permita a montagem em mais de uma posição, acarretando em uma montagem na posição incorreta
- 4.3- O componente passível de manutenção não deve possuir soluções de fixação impossíveis de serem adotadas pelo executor da manutenção durante o processo de desmontagem e montagem (ex.: componentes colados / soldados por processos especiais, rebites, etc)
- 4.4- Elementos de fixação devem ser dimensionados para que suportem o número de ciclos de manutenção para o qual o componente ou sistema foi dimensionado
- 4.5- Componentes muito vulneráveis a manutenção devem ser concebidos de forma que possam ser desmembradas do conjunto e substituídas individualmente
- 4.7- Componentes que necessitam de alinhamento na montagem devem possuir marcações robustas, duradouras e de fácil identificação. Soluções que proporcionam o auto posicionamento devem ser adotadas.
- 4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada
- 4.10- A montagem e desmontagem deve requerer uma única pessoa

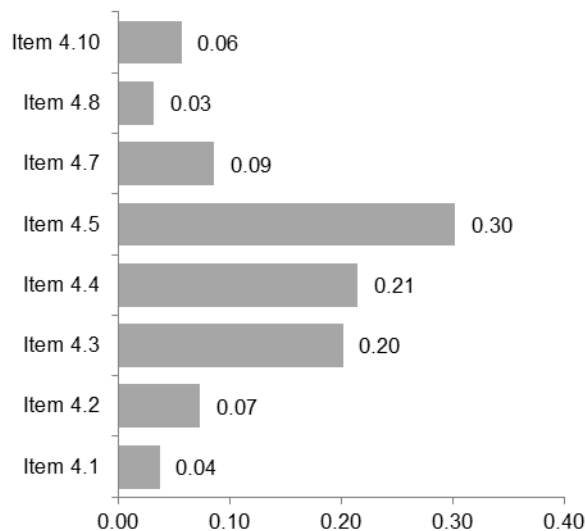


Figura 81 – Matriz comparativa para o grupo montagem e desmontagem utilizada na descrição do método

Ferramentas			Item 5.1	Item 5.2	Item 5.3
Item 5.1			1	1	1/7
Item 5.2			1	1	1/5
Item 5.3			7	5	1
Total (Soma)			9.00	7.00	1.34
					Auto-Vetor
Item 5.1			0.11	0.14	0.11
Item 5.2			0.11	0.14	0.15
Item 5.3			0.78	0.71	0.74
Vetor Auto-Vetor			0.12	0.13	0.75
Total (Soma)			9.00	7.00	1.34
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)			3.02		
IC			0.01		
RC			0.02	2%	

Items

5.1- As ferramentas utilizadas para a execução de qualquer operação de manutenção (Desmontagem, montagem, diagnóstico e calibração) devem ser padrões e disponíveis no mercado, evitando-se o desenvolvimento de ferramentas especiais para a operação

5.2- O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado

5.3- A montagem e utilização da ferramenta não deve requerer mais de uma pessoa (operador).

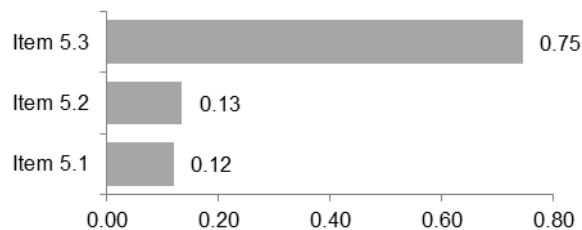


Figura 82 – Matriz comparativa para o grupo ferramentas utilizada na descrição do método

APÊNDICE B - Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação aos critérios dos itens das RBMs

Este apêndice apresenta as matrizes comparativas para os critérios dos itens das RBMs e seus respectivos valores obtidos para o Índice e a Razão de Consistência para o conteúdo apresentado na seção 3.2.3.9.

1.1 - Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

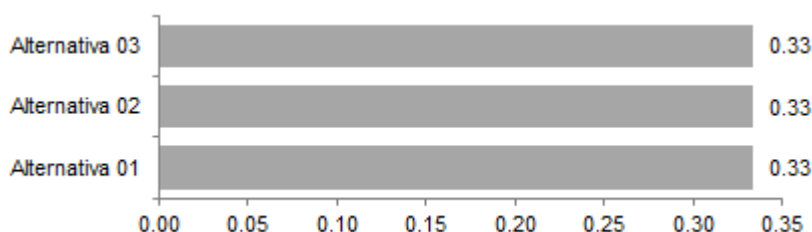


Figura 83 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.1 das RBMs

1.6 - Componentes que possuem fluidos internos devem possuir pontos de drenagem sem obstrução

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

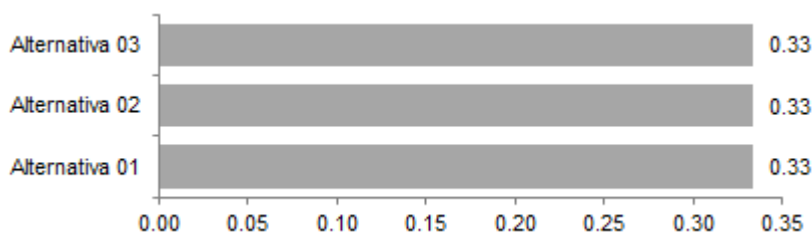


Figura 84 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.6 das RBMs

2.2 - Procedimentos de calibração e regulagem não devem demandar a desmontagem de outros componentes ou sistemas alheios ao procedimento

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo (AMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

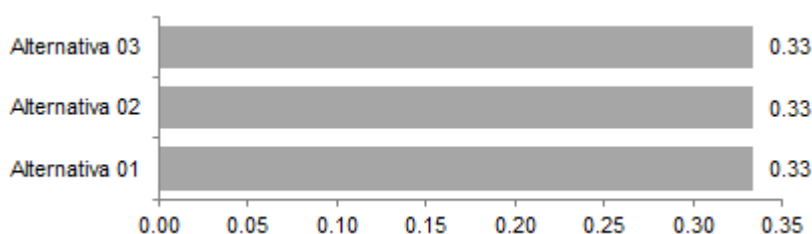


Figura 85 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 2.2 das RBMs

2.4 - Componentes livres de manutenção, lubrificação, reabastecimento e calibração devem ser considerados

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo (AMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

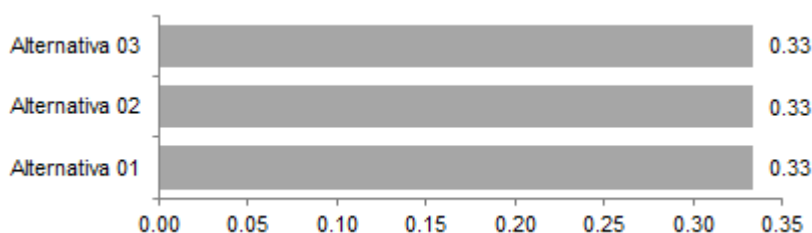


Figura 86 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 2.4 das RBMs

2.5 - O componente ou sistema deve ser projetado com torques de aperto compatíveis com ferramentas padrão

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1/5		
Alternativa 02	1	1	1/5		
Alternativa 03	5	5	1		
Total (Soma)	7.00	7.00	1.40	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Alternativa 02	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Alternativa 03	0.71	0.71	0.71	0.71	71%
Vetor Auto-Vetor	0.14	0.14	0.71		
Total (Soma)	7.00	7.00	1.40		
Auto Valor Máximo (λMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			



Figura 87 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 2.5 das RBMs

3.1 - Todos os potenciais modos de falhas e suas causas raiz devem ter uma correspondente meio de rastreamento e detecção

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo (λMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

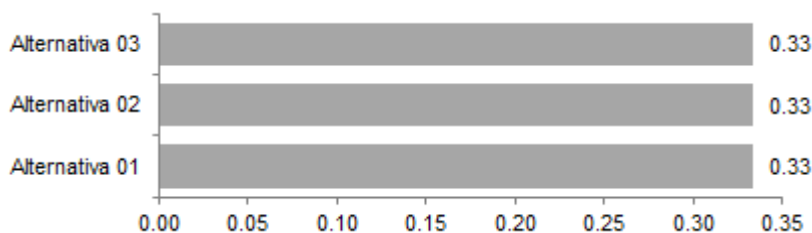


Figura 88 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.1 das RBMs

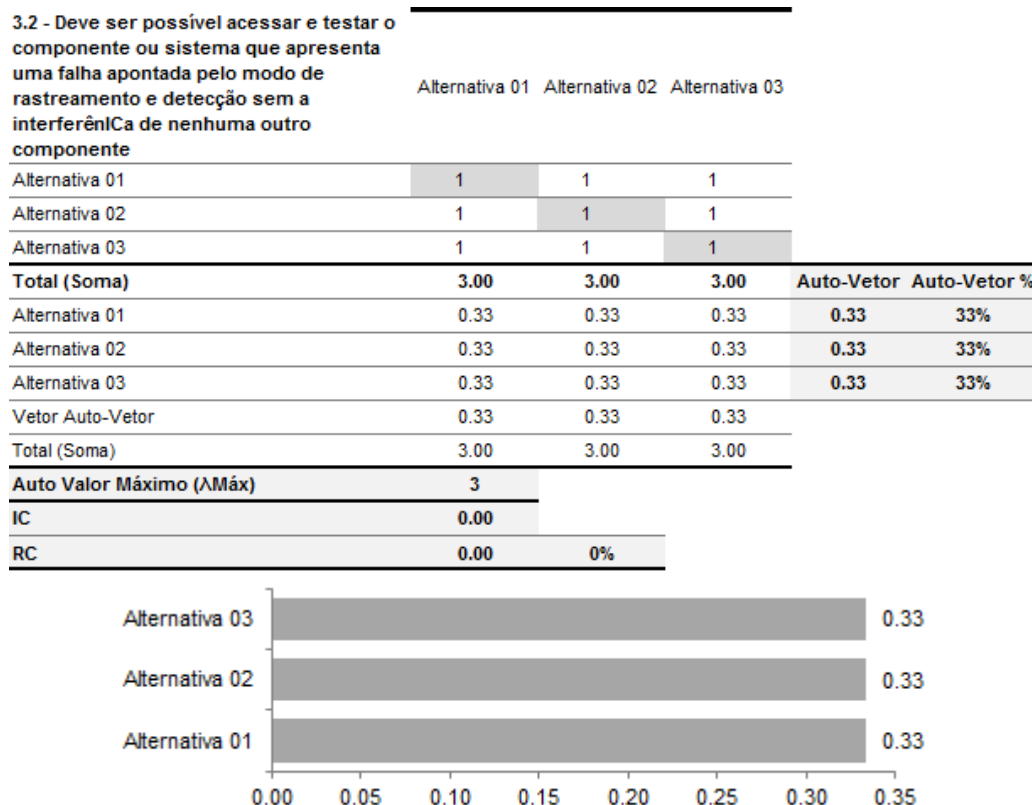


Figura 89 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.2 das RBMs

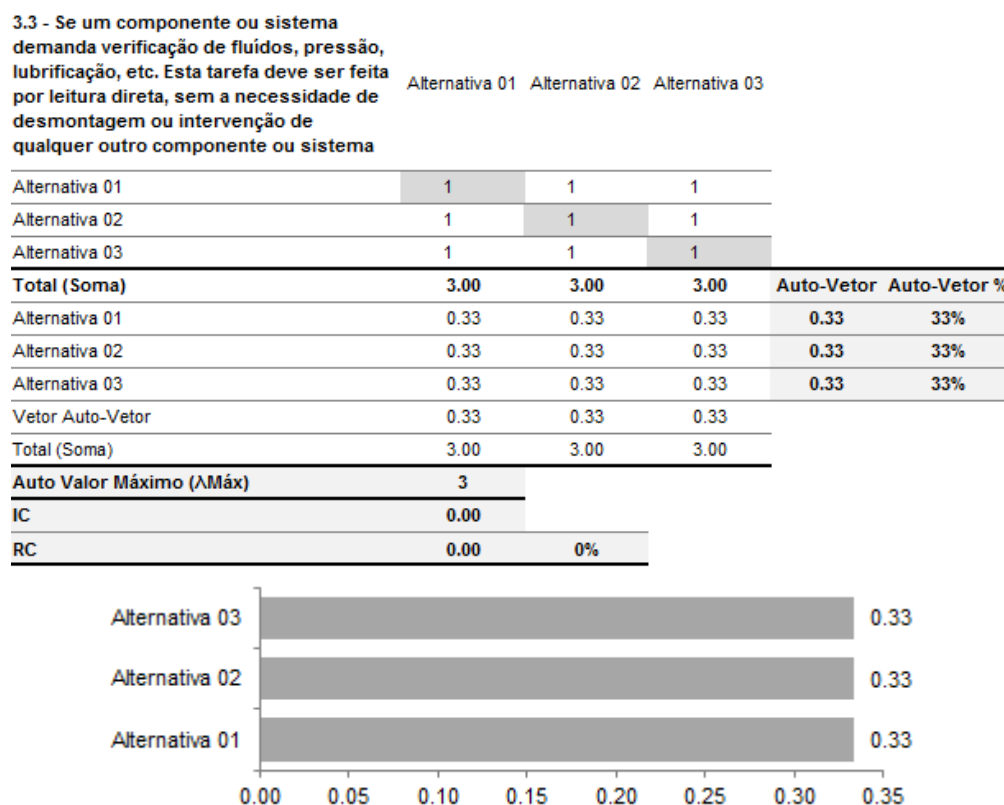


Figura 90 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.3 das RBMs

3.4 - Intervalos de manutenção de mais de um componentes ou sistema devem ser sinRConizados de modo a reduzir a indisponibilidade do produto

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo (λMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

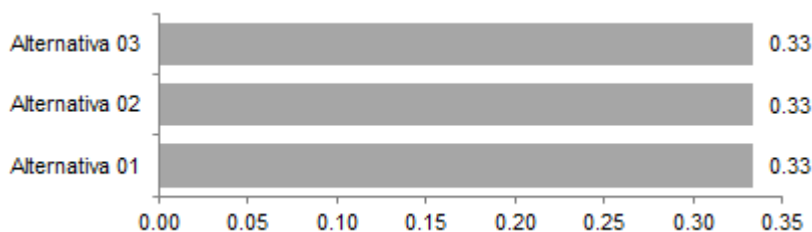


Figura 91 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.4 das RBMs

3.5 - Operações de diagnóstico deve requerer uma única pessoa

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo (λMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

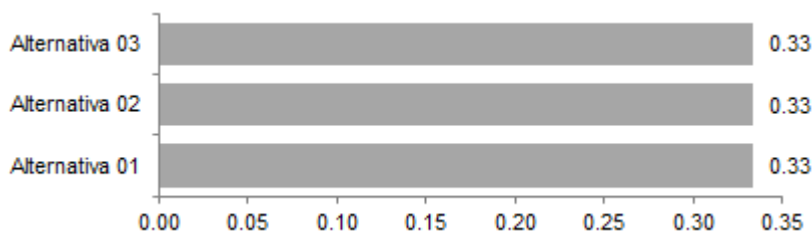


Figura 92 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 3.5 das RBMs

4.1 - O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo (λMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

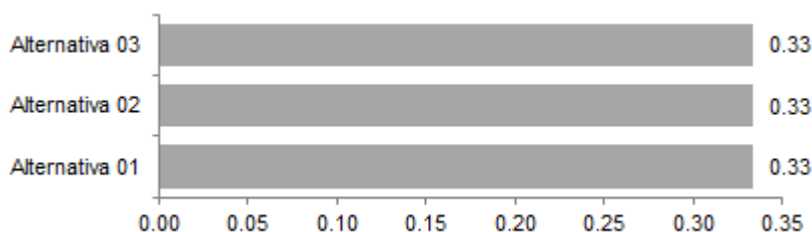


Figura 93 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.1 das RBMs

4.2 - O componente passível de manutenção deve ser projetado de forma que não permita a montagem em mais de uma posição, acarretando em uma montagem na posição incorreta

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1/5	1/5		
Alternativa 02	5	1	1		
Alternativa 03	5	1	1		
Total (Soma)	11.00	2.20	2.20	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.09	0.09	0.09	0.09	9%
Alternativa 02	0.45	0.45	0.45	0.45	45%
Alternativa 03	0.45	0.45	0.45	0.45	45%
Vetor Auto-Vetor	0.09	0.45	0.45		
Total (Soma)	11.00	2.20	2.20		
Auto Valor Máximo (λMáx)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

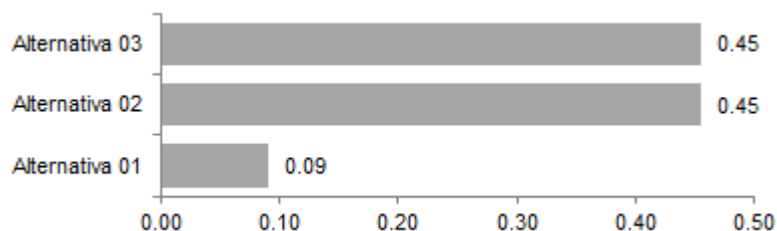


Figura 94 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.2 das RBMs

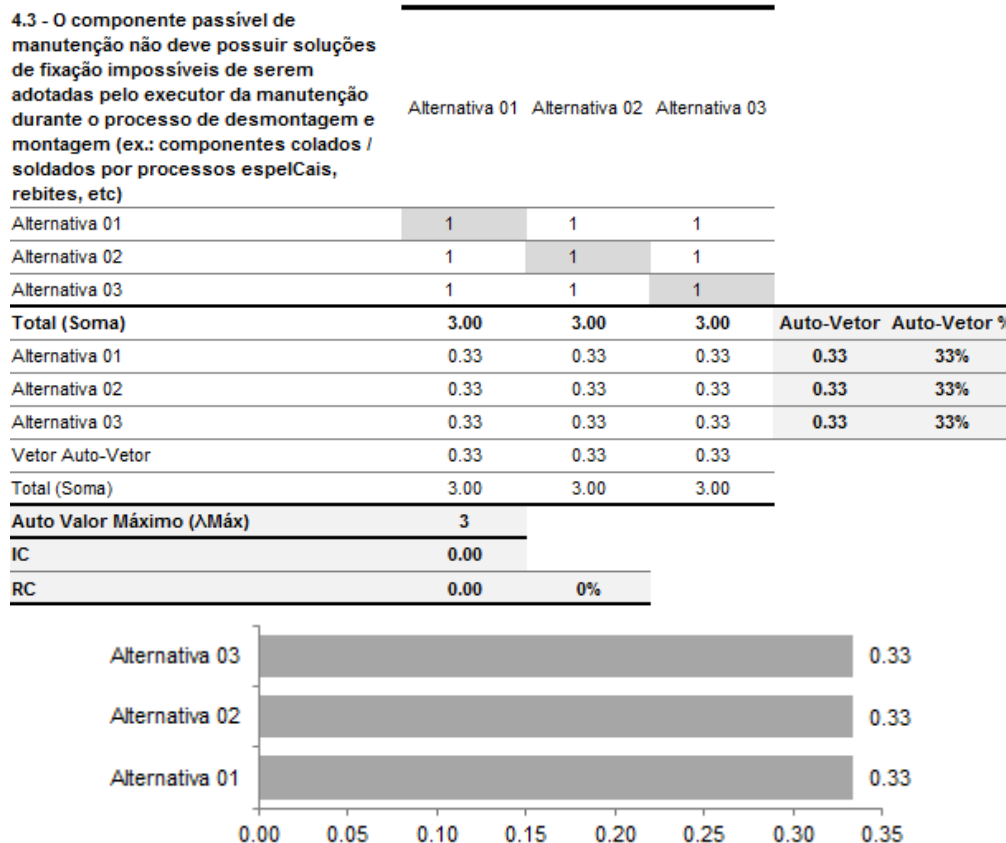


Figura 95 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.3 das RBMs

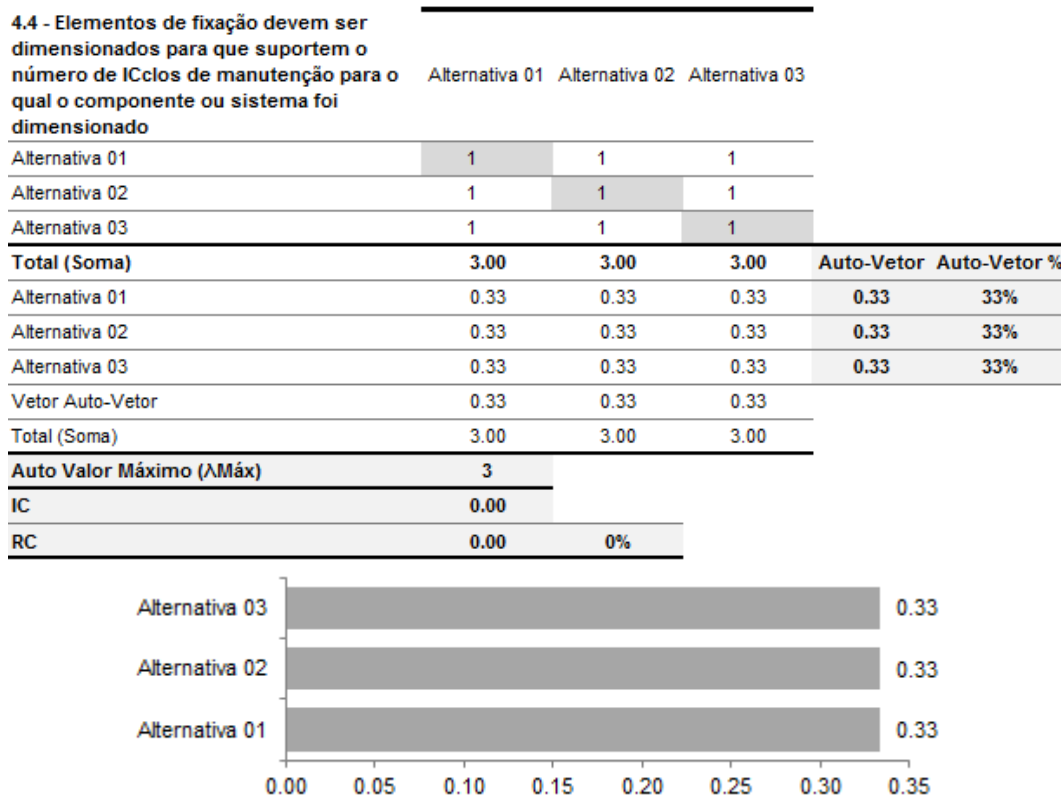


Figura 96 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.4 das RBMs

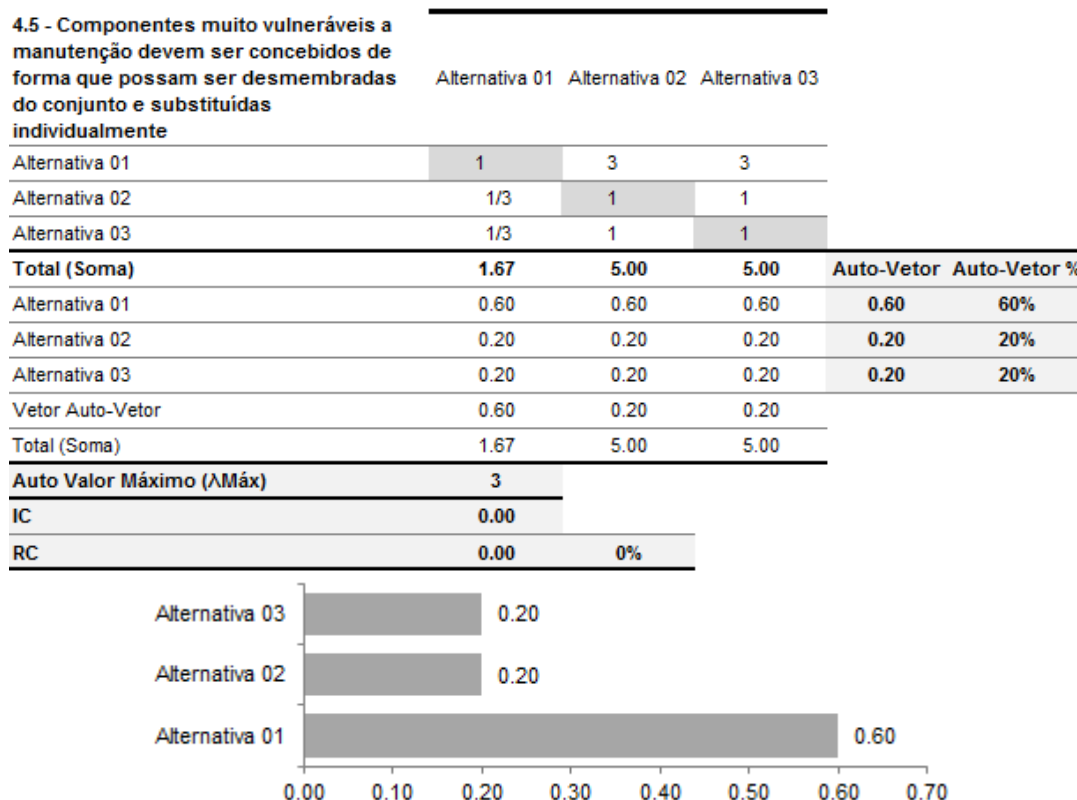


Figura 97 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.5 das RBMs

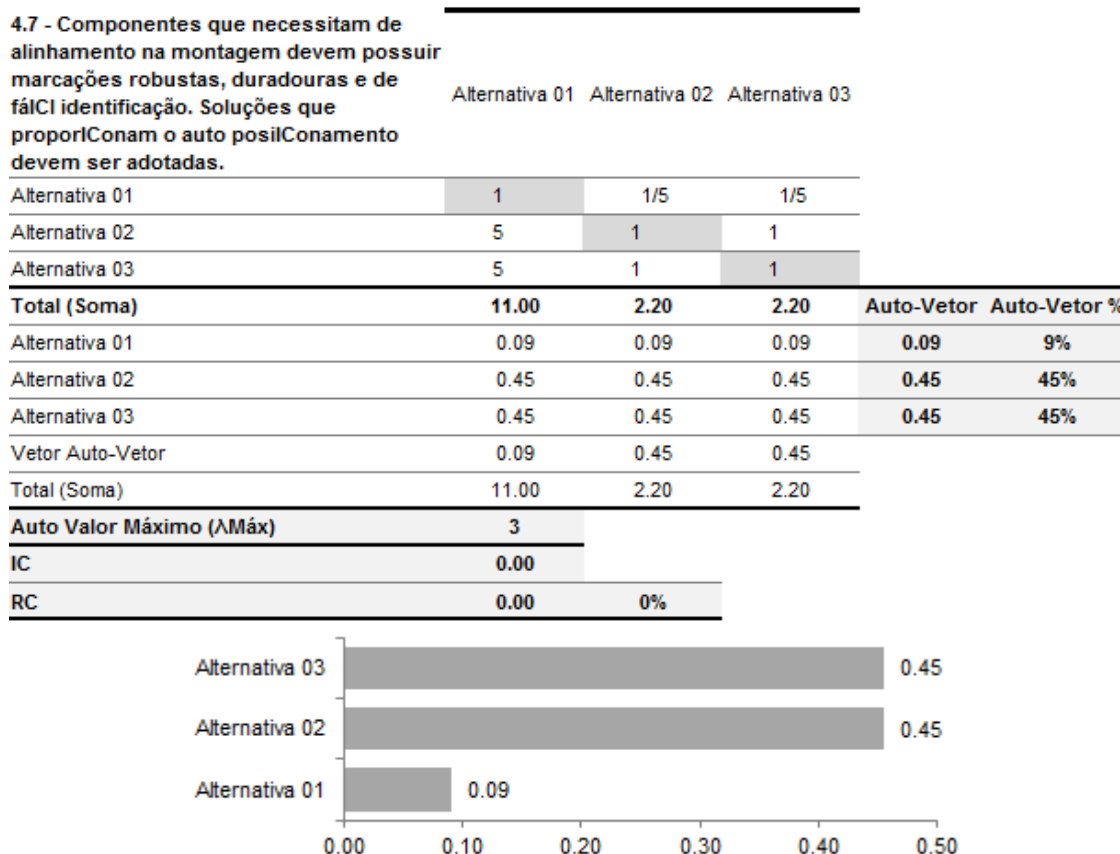


Figura 98 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.7 das RBMs

4.8 - Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

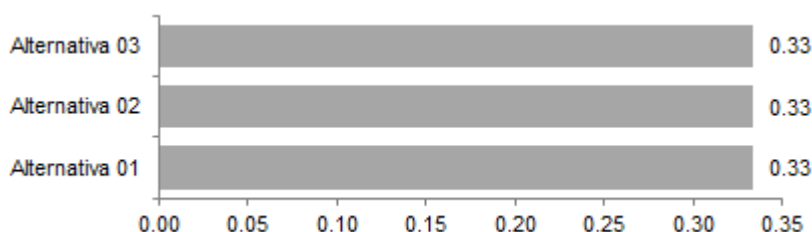


Figura 99 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.8 das RBMs

4.10 - A montagem e desmontagem deve requerer uma única pessoa

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

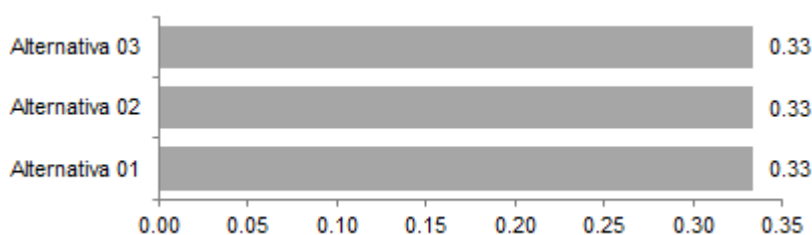


Figura 100 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.10 das RBMs

5.1 - As ferramentas utilizadas para a execução de qualquer operação de manutenção (Desmontagem, montagem, diagnóstico e calibração) devem ser padrões e disponíveis no mercado, evitando-se o desenvolvimento de ferramentas especiais para a operação

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1/5		
Alternativa 02	1	1	1/5		
Alternativa 03	5	5	1		
Total (Soma)	7.00	7.00	1.40	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Alternativa 02	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Alternativa 03	0.71	0.71	0.71	0.71	71%
Vetor Auto-Vetor	0.14	0.14	0.71		
Total (Soma)	7.00	7.00	1.40		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

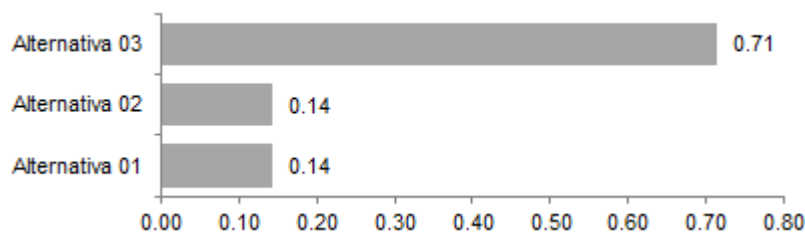


Figura 101 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.1 das RBMs

5.2 - O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	1/5		
Alternativa 02	1	1	1/5		
Alternativa 03	5	5	1		
Total (Soma)	7.00	7.00	1.40	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Alternativa 02	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Alternativa 03	0.71	0.71	0.71	0.71	71%
Vetor Auto-Vetor	0.14	0.14	0.71		
Total (Soma)	7.00	7.00	1.40		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

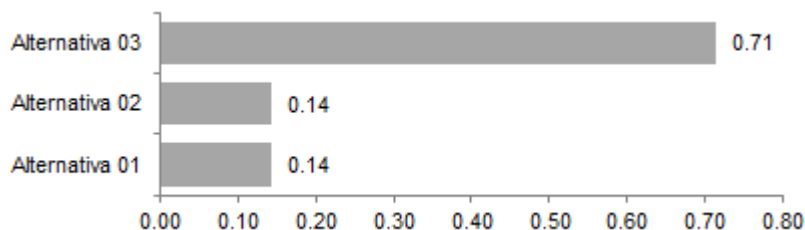


Figura 102 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.2 das RBMs

5.3 - A montagem e utilização da ferramenta não deve requerer mais de uma pessoa (operador).					
	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	1	1	1		
Alternativa 02	1	1	1		
Alternativa 03	1	1	1		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Alternativa 01	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 02	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Alternativa 03	0.33	0.33	0.33	0.33	33%
Vetor Auto-Vetor	0.33	0.33	0.33		
Total (Soma)	3.00	3.00	3.00		
Auto Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)	3				
IC	0.00				
RC	0.00	0%			

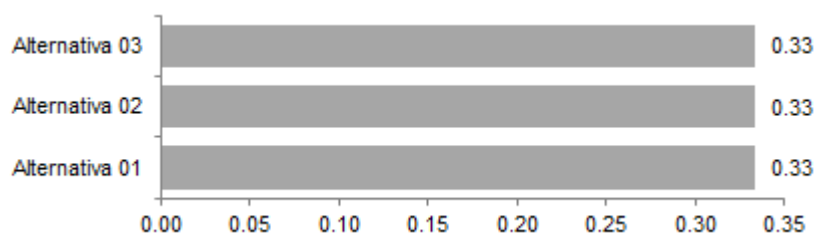


Figura 103 – Matriz comparativa (utilizada na descrição do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.3 das RBMs

APÊNDICE C - Matrizes comparativas e os valores obtidos para o Índice e Razão de Consistência dos grupos das RBMs utilizadas na aplicação do método

Este apêndice apresenta as matrizes comparativas para os grupos das RBMs e seus respectivos valores obtidos para o Índice e a Razão de Consistência para o conteúdo apresentado na seção 4.1.2.3.

Acessibilidade		Item 1.1	Item 1.5		
Item 1.1		1	3		
Item 1.5		1/3	1		
Total (Soma)		1.33	4.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Item 1.1		0.75	0.75	0.75	75%
Item 1.5		0.25	0.25	0.25	25%
Vetor Auto-Vetor		0.75	0.25		
Total (Soma)		1.33	4.00		
Auto-Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)		2.00			
IC		0.00			
RC		0.00	0%		

Items
1.1- Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes
1.5- Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção

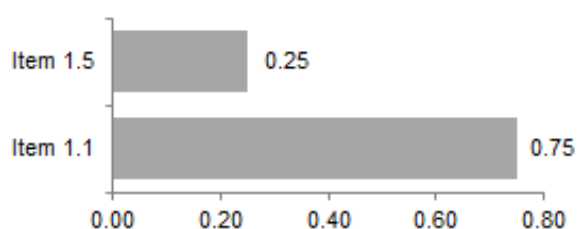


Figura 104 – Matriz comparativa para o grupo acessibilidade utilizada na aplicação do método

Desmontagem Montagem		Item 4.1	Item 4.8		
Item 4.1		1	7		
Item 4.8		1/7	1		
Total (Soma)		1.14	8.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Item 4.1		0.88	0.88	0.88	88%
Item 4.8		0.13	0.13	0.13	13%
Vetor Auto-Vetor		0.88	0.13		
Total (Soma)		1.14	8.00		
Auto-Valor Máximo ($\lambda_{Máx}$)		2.00			
CI		0.00			
CR		0.00			

Items
4.1- O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.
4.8- Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada

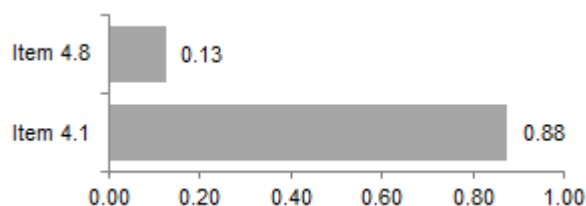


Figura 105 – Matriz comparativa para o grupo montagem e desmontagem utilizada na aplicação do método

APÊNDICE D – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação aos critérios dos itens das RBMs

Este apêndice apresenta as matrizes comparativas para os critérios dos itens das RBMs e seus respectivos valores obtidos para o Índice e a Razão de Consistência para o conteúdo apresentado na seção 4.2.

1.1 - Componentes passíveis de manutenção devem possuir acesso direto, sem a desmontagem de outros componentes

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	5		
Alternativa 02	1	1	5		
Alternativa 03	1/5	1/5	1		
Total (Soma)	2.20	2.20	11.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.45	0.45	0.45	0.45	45%
Alternativa 02	0.45	0.45	0.45	0.45	45%
Alternativa 03	0.09	0.09	0.09	0.09	9%
Vetor Auto-Vetor	0.45	0.45	0.09		
Total (Soma)	2.20	2.20	11.00		
Auto-Valor Máximo (λMáx)	3				
CI	0.00				
CR	0.00	0%			

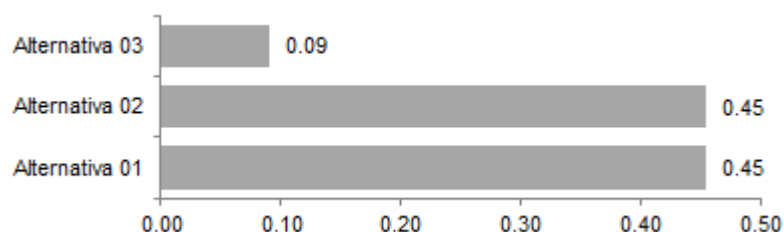


Figura 106 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.1 das RBMs

1.5 - Os componentes de fixação devem possuir espaço suficiente para acesso de ferramentas e corpo do executor da operação de manutenção

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1/3	1/3		
Alternativa 02	3	1	1		
Alternativa 03	3	1	1		
Total (Soma)	7.00	2.33	2.33	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Alternativa 02	0.43	0.43	0.43	0.43	43%
Alternativa 03	0.43	0.43	0.43	0.43	43%
Vetor Auto-Vetor	0.14	0.43	0.43		
Total (Soma)	7.00	2.33	2.33		
Auto-Valor Máximo (λMáx)	3				
CI	0.00				
CR	0.00	0%			

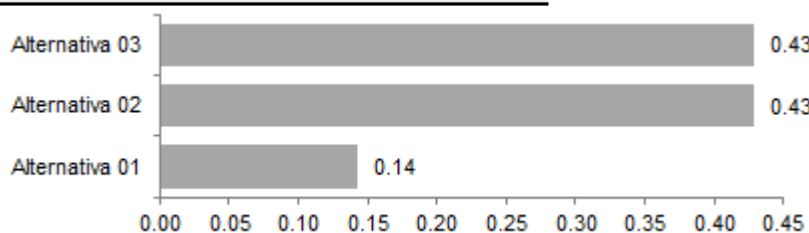


Figura 107 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 1.5 das RBMs

4.1 - O número de componentes que devem ser desmontados ou removidos e que não pertencem ao sistema em que a atividade de manutenção está sendo executada deve ser nulo.

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	7		
Alternativa 02	1	1	7		
Alternativa 03	1/7	1/7	1		
Total (Soma)	2.14	2.14	15.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.47	0.47	0.47	0.47	47%
Alternativa 02	0.47	0.47	0.47	0.47	47%
Alternativa 03	0.07	0.07	0.07	0.07	7%
Vetor Auto-Vetor	0.47	0.47	0.07		
Total (Soma)	2.14	2.14	15.00		
Auto-Valor Máximo ($\lambda_{M\acute{a}x}$)	3				
CI	0.00				
CR	0.00	0%			

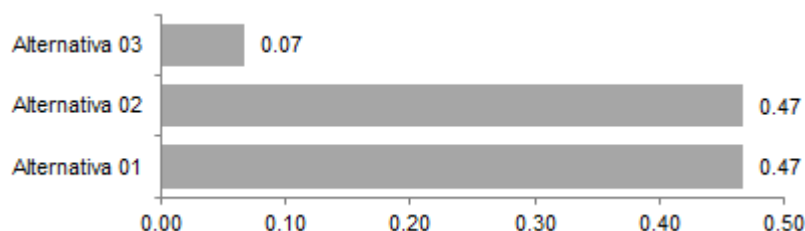


Figura 108 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.1 das RBMs

4.8 - Diversidade de elementos de fixação (formas e dimensões) em um mesmo componente ou sistema deve ser evitada

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	3		
Alternativa 02	1	1	3		
Alternativa 03	1/3	1/3	1		
Total (Soma)	2.33	2.33	7.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.43	0.43	0.43	0.43	43%
Alternativa 02	0.43	0.43	0.43	0.43	43%
Alternativa 03	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Vetor Auto-Vetor	0.43	0.43	0.14		
Total (Soma)	2.33	2.33	7.00		
Auto-Valor Máximo ($\lambda_{M\acute{a}x}$)	3				
CI	0.00				
CR	0.00	0%			

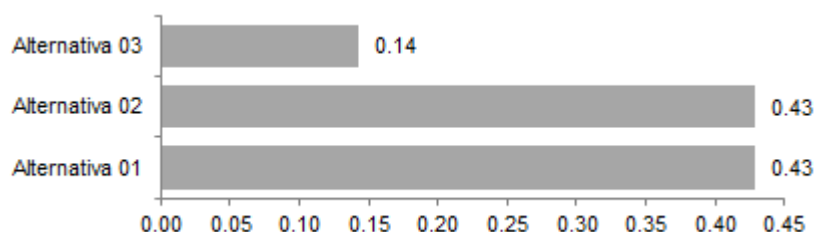


Figura 109 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 4.8 das RBMs

5.2 - O menor número de ferramentas para restabelecer o produto em suas condições normais de operação deve ser considerado

	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03		
Alternativa 01	1	1	3		
Alternativa 02	1	1	3		
Alternativa 03	1/3	1/3	1		
Total (Soma)	2.33	2.33	7.00	Auto-Vetor	Auto-Vetor %
Alternativa 01	0.43	0.43	0.43	0.43	43%
Alternativa 02	0.43	0.43	0.43	0.43	43%
Alternativa 03	0.14	0.14	0.14	0.14	14%
Vetor Auto-Vetor	0.43	0.43	0.14		
Total (Soma)	2.33	2.33	7.00		
Auto-Valor Máximo (AMáx)	3				
CI	0.00				
CR	0.00	0%			

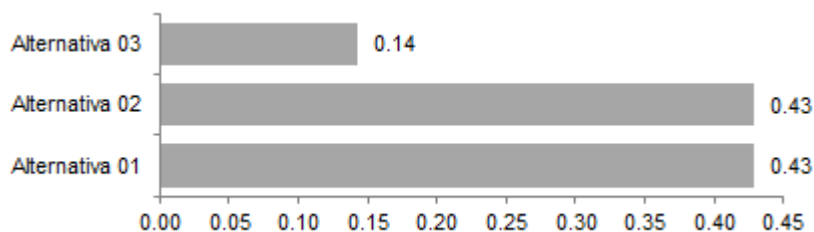


Figura 110 – Matriz comparativa (utilizada na aplicação do método) e resultado da priorização das alternativas (conceitos) em relação ao critério 5.2 das RBMs