

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LEANDRO ROBERTO BARAN

PROPOSTA DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA
DETERMINAÇÃO DA CRITICIDADE NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO
INDUSTRIAL

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2015

LEANDRO ROBERTO BARAN

**PROPOSTA DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA
DETERMINAÇÃO DA CRITICIDADE NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO
INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Trojan

PONTA GROSSA

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.23/15

B225 Baran, Leandro Roberto

Proposta de um modelo multicritério para determinação da criticidade na gestão da manutenção industrial. / Leandro Roberto Baran. -- Ponta Grossa, 2015.

154 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Trojan

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

1. Manutenção - Administração. 2. Processo decisório por critério múltiplo. 3. Engenharia de produção. I. Trojan, Flávio. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº 275/2015

PROPOSTA DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DA
CRITICIDADE NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

por

Leandro Roberto Baran

Esta dissertação foi apresentada às **15 horas de 02 de Abril de 2015** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures
(PUC-PR)

Prof. Dr. Rui Francisco Martins Marçal
(PUC-PR)

Prof. Dr. Antonio Vanderley Herrero Sola
(UTFPR)

Prof. Dr. Flávio Trojan
Orientador

Prof. Dr. Aldo Braghini Junior
Coordenador do PPGEP

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR –CÂMPUS PONTA GROSSA

AGRADECIMENTOS

Neste momento, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

A Deus sem o qual não seria possível essa conquista, fornecendo a proteção, sabedoria e ânimo necessário para vencer esta jornada.

Ao Professor Dr. Flávio Trojan, pela sabedoria, paciência e amizade transmitida durante toda minha formação, com participação fundamental neste trabalho.

Aos docentes do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e em especial ao Prof. Dr. Antonio Vanderley Herrero Sola por também participar deste trabalho.

Aos meus pais que acreditaram nesse sonho e não mediram esforços para que eu pudesse concretizá-lo, sempre ao meu lado com todo o apoio necessário. Pai, obrigado por tudo.

A minha esposa Fabiane Erdmann, por todo apoio, amor e companheirismo demonstrados durante esta jornada, os quais foram fundamentais não só na conclusão deste trabalho, mas também nos passos mais importantes da minha vida.

A todos os meus amigos por contribuírem, cada um à sua maneira, com a realização deste trabalho.

Ao Instituto Federal do Paraná e ao SENAI por acreditarem e contribuírem na formação de seus colaboradores.

A todos vocês meu muito obrigado.

RESUMO

BARAN, Leandro Roberto. **Proposta de um Modelo Multicritério Para Determinação Da Criticidade Na Gestão Da Manutenção Industrial**. 2015. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Esse trabalho tem como objetivo propor um modelo para determinação da criticidade em processos industriais, utilizando a análise multicritério. Inicialmente é proposta uma classificação por prioridade dos elementos mais críticos de um sistema industrial e posteriormente, uma ordenação desses elementos dentro das suas respectivas classes de criticidade, obtendo com isso a criticidade de cada um. O modelo baseia-se nos métodos de sobreclassificação ELECTRE TRI e PROMETHEE II. Uma aplicação do modelo é realizada nesse trabalho, onde são considerados os critérios: segurança; meio-ambiente; qualidade; impacto operacional; impactos econômicos; tempo médio entre falhas e tempo médio de reparo. Como resultado, são apresentadas comparações do modelo proposto com os métodos tradicionais de determinação de criticidade, procurando observar aspectos subjetivos e objetivos de forma conjunta, a fim de fornecer uma visão clara e sistêmica sobre os problemas implícitos na determinação da criticidade em sistemas industriais. É possível concluir que o uso da análise multicritério na determinação da criticidade possibilita maior profundidade na avaliação e constitui uma ferramenta que auxilia na gestão da manutenção e no aumento da confiabilidade para os sistemas produtivos.

Palavras-chave: Análise de Criticidade. Gestão da Manutenção. Decisão Multicritério.

ABSTRACT

BARAN, Leandro Roberto. **Proposal of a Multicriteria Model For Determination Of Criticality In Industrial Maintenance Of Management.** 2015. 153f. Dissertation (Master in Production Engineering) – Federal University of Technology. Ponta Grossa, 2015.

This work aims to propose a model for determining the criticality in industrial processes, using the multi-criteria analysis. Initially it is proposed a priority rating of the most critical elements of an industrial system and later, an ordering of the elements within their respective classes of criticality, thus obtaining the criticality of each. The model is based on outranking methods ELECTRE TRI and PROMETHEE II. An application of the model is carried out in this work, where the criteria are considered: security; environment; quality; operational impact; economic impacts; mean time between failures and mean time to repair. As a result, are presented comparisons of the proposed model with the traditional methods of determination of criticality, trying to observe subjective aspects and objectives jointly in order to provide a clear and systemic view of the problems implicit in determining the criticality in industrial systems. It was concluded that the use of multi-criteria analysis to determine criticality enables greater depth in the assessment and is a tool that helps in the management of maintenance and increased reliability for production systems.

Keywords: Criticality Analysis. Maintenance Management. Multicriteria Decision.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Áreas de integração do trabalho	17
Figura 2 – Classificação ABC (Critérios e Fluxo Decisional)	23
Figura 3 – Processo de Implantação MCC	25
Figura 4 – Exemplo de modelagem do ELECTRE TRI	39
Figura 5 – Limites entre categorias	40
Figura 6 – Função de Preferência Tipo 1	44
Figura 7 – Função de Preferência Tipo 2	44
Figura 8 – Função de Preferência Tipo 3	45
Figura 9 – Função de Preferência Tipo 4	45
Figura 10 – Função de Preferência Tipo 5	46
Figura 11 – Função de Preferência Tipo 6	46
Figura 12 – Perfil de superação de cada alternativa	48
Figura 13 – Modelo multicritério para priorização de modos de falha	54
Figura 14 – Modelo de avaliação multicritério do RPN	56
Figura 15 – Modelo multicritério de análise de criticidade	58
Figura 16 – Exemplo de uma árvore de máquina de um equipamento	61
Figura 17 – Zonas de controle de tensão	68
Figura 18 – Controle de tensão do embobinador	70
Figura 19 – Exemplo de cálculo dos critérios MTBF, MTTR e DT	74
Figura 20 – Estrutura hierárquica do Sistema de Tensionamento	78
Figura 21 – Diagrama de aplicação do método	90
Figura 22 – Ordenamento das alternativas utilizando o PROMETHE II	100
Figura 23 – Classificação ABC	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência da falha.....	30
Tabela 2 – Hierarquização dos critérios.....	76
Tabela 3 – Padronização da Matriz de Avaliação.....	88
Tabela 4 – Perfil limite entre as classes.....	89
Tabela 5 – Limites de preferência e indiferença.....	89
Tabela 6 – Estatística dos resultados.....	92
Tabela 7 – Matriz de avaliação para aplicação do PROMETHEE II.....	96
Tabela 8 – Ordenação PROMETHEE II.....	98
Tabela 9 – Variação dos pesos utilizada na análise de sensibilidade.....	101
Tabela 10 – Variação apresentada na análise de sensibilidade.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Versões dos métodos da família ELECTRE.....	36
Quadro 2 – Aplicações multicritério em manutenção industrial.....	49
Quadro 3 – Seleção de alternativas para aplicação do modelo (exemplo).....	62
Quadro 4 – Critérios aplicados em problemáticas de manutenção.....	63
Quadro 5 – Critérios selecionados para aplicação.....	71
Quadro 6 – Pontuação para o critério g_1	72
Quadro 7 – Pontuação para o critério g_3	72
Quadro 8 – Pontuação para o critério g_4	73
Quadro 9 – Classes de Criticidade.....	77
Quadro 10 – Matriz de Avaliação.....	79
Quadro 11 – Classificação ELECTRE TRI.....	91
Quadro 12 – Comparações do procedimento de classificação.....	93
Quadro 13 – Modelagem de preferências do PROMETHEE II.....	97
Quadro 14 – Comparação Classificação ABC x Modelo.....	104
Quadro 15 – Comparação RPN x Modelo.....	105

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	16
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ANÁLISE DE CRITICIDADE	19
2.2 MÉTODOS APLICADOS NA ANÁLISE DE CRITICIDADE.....	21
2.2.1 Número de risco.....	22
2.2.2 Classificação ABC	22
2.2.3 Manutenção Centrada em Confiabilidade	23
2.2.4 Parâmetros para Avaliação de Criticidade	26
2.3 APOIO A DECISÃO MULTICRITÉRIO	31
2.3.1 Fases do Processo de Decisão	32
2.3.2 Atores	33
2.3.3 Problemáticas	33
2.4 MÉTODOS MULTICRITÉRIO	34
2.4.1 Família ELECTRE.....	35
2.4.2 ELECTRE TRI.....	39
2.4.3 Metodologia PROMETHEE	42
2.4.4 PROMETHEE I	46
2.4.5 PROMETHEE II	47
2.5 MODELOS MULTICRITÉRIOS APLICADOS EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL 48	
2.5.1 Modelos Multicritérios aplicados na priorização de Sistemas Críticos	53
3 PROPOSIÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO PARA ANÁLISE DE CRITICIDADE	58
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA	59
3.2 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E CATEGORIAS	60
3.2.1 Definição das alternativas	60
3.2.2 Definição dos Critérios	62
3.2.3 Peso dos critérios	64
3.2.4 Definição das categorias.....	64
3.3 DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ DE AVALIAÇÃO.....	64
3.3.1 Modelagem de Preferências	65
3.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIOS	65
4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO NA ANÁLISE DE CRITICIDADE DE UM EQUIPAMENTO INDUSTRIAL	67
4.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E CONTEXTO OPERACIONAL	67

4.2	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS	71
4.2.1	Definição dos pesos dos critérios	75
4.3	CATEGORIAS DE AVALIAÇÃO	77
4.4	IDENTIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS	78
4.5	MODELAGEM DE PREFERÊNCIAS	87
4.6	APLICAÇÃO DO ELECTRE TRI	90
4.6.1	Considerações sobre aplicação do ELECTRE TRI	92
4.7	APLICAÇÃO DO PROMETHEE II	94
4.7.1	Considerações sobre aplicação do PROMETHEE II	99
4.7.2	Análise de Sensibilidade	100
4.8	ANÁLISE DA APLICAÇÃO	103
5	CONCLUSÃO	106
5.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS	107
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

As ações de planejamento e gestão da manutenção em ambientes industriais estão diretamente relacionadas com a criticidade de suas peças e equipamentos, que precisa ser determinada com base em critérios operacionais. As ocorrências de falhas em equipamentos vitais ao processo produtivo aumentam em decorrência da constante utilização dos equipamentos e a medida que eles se encaminham para o fim da sua vida útil. A indisponibilidade de um equipamento pode ocasionar aumento nos custos de produção, impactos financeiros, redução na qualidade do produto, além de também elevar a probabilidade de ocorrência de acidentes. Essa situação, inerente aos processos produtivos industriais, destaca a manutenção como fundamental para reduzir essa probabilidade de ocorrência de falhas. Além disso, se esse equipamento possuir maior criticidade dentro do processo pode causar perdas de produção, paradas indesejadas e indisponibilidade. Assim, a criticidade deve ser tratada dentro da gestão da manutenção como ponto de partida para o planejamento.

Hijes e Cartagena (2005) destacam que qualquer ação de manutenção tem como objetivo inicial garantir o funcionamento do sistema e a disponibilidade do mesmo, através da garantia da confiabilidade, e da observação de que quanto mais crítico um sistema, maior deve ser a preocupação com o planejamento da manutenção desse sistema.

A IEC 60518 (2006) define a criticidade de um sistema como o impacto ou a importância de um modo de falha, que exige controle e redução, e objetiva quantificar a amplitude relativa do efeito de cada falha, a fim de auxiliar na tomada de decisão.

O foco da análise de criticidade consiste na identificação do impacto de equipamentos na indisponibilidade de sistemas industriais (ou de outros eventos externos que afetam o processo) durante determinado período de tempo, observando as interações entre processos, modelos de confiabilidade, variações dos parâmetros e características operacionais de cada processo (CAROT & SANZ, 2000; TOMAIDIS & PISTIKOPOULOS, 2004).

A literatura apresenta vários métodos já desenvolvidos para análise de criticidade, tais como: Árvore de Falhas, Avaliação de Risco, Análise Crítica dos Modos de Falha e Efeitos (FMECA) (TOMAIDIS & PISTIKOPOULOS, 2004). Em abordagens quantitativas, alguns indicadores são utilizados, tais como: taxa de falha, taxa de efeitos das falhas e índices de manutenção (MIL-1629, 1980; IEC 60812,

2006). Em abordagens qualitativas são observados alguns critérios operacionais específicos, baseados na experiência dos avaliadores e especialistas (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009).

No entanto, os métodos quantitativos apresentam uma deficiência comum: não consideram as características inerentes de cada processo, assim como as interações entre eles, além dos critérios operacionais específicos, tais como os critérios econômicos, segurança e meio ambiente (TENG & HO, 2000; TOMAIDIS & PISTIKOPOULOS, 2004; GILCHRIST, 1996). Siqueira (2009) destaca que grande parte das instalações em operação não possuem dados matemáticos ou históricos de falhas de seus sistemas, restando a esses uma abordagem qualitativa tradicional, a qual pode ser influenciada pela visão específica do analista, o que pode não refletir a real necessidade de manutenção desses sistemas.

Conforme observam Zammori e Gabrielli (2011) em circunstâncias normais de operação, a criticidade de um sistema não resulta apenas de um fator, mas sim de vários fatores inter-relacionados, avaliados e analisados mediante a sua importância dentro do processo.

Considerando todos esses aspectos, define-se a seguinte problemática, à ser elucidada a partir do questionamento:

Como realizar uma análise de criticidade em processos industriais, considerando as características inerentes a cada processo, através de análises e avaliações que considerem múltiplos critérios e que também representem as diversas relações entre os sistemas?

1.1 JUSTIFICATIVA

Priorizações ou tomadas de decisões nas organizações em geral estão sempre ligadas a conflitos de preferências entre os membros e aos diferentes interesses em atender objetivos distintos.

Essa afirmação também pode ser estendida para a análise de criticidade, por exemplo, quando dois equipamentos disputam a criticidade num processo produtivo e geram conflitos entre as preferências dos gestores da produção e da manutenção. Em determinado momento será preciso decidir sobre manter o equipamento em funcionamento até a quebra ou fazer uma parada para manutenção preventiva, para

garantir a confiabilidade. Além disso, a criticidade de equipamentos envolve avaliações de aspectos subjetivos em alguns casos e objetivos em outros, tornando o contexto da análise mais complexo, Nesse sentido, parte-se da premissa que o seu resultado deve ser oriundo das preferências de um grupo de especialistas (técnicos, gestores e operadores) e sujeito a vários critérios a serem ponderados.

Conforme Gomes *et al.* (2004) a tomada de decisão pode ser definida como um esforço para solucionar o dilema dos critérios conflituosos, os quais impedem a visão de uma melhor solução. Dentro dessa perspectiva, Vincke (1992) afirma que os Métodos Multicritérios oferecem uma importante ferramenta de tomada de decisão, ao conceder aptidão para o decisor solucionar problemas que envolvem vários pontos de vista conflitantes e diferentes critérios a serem ponderados.

Os métodos de Apoio a Decisão Multicritérios, possuem um caráter científico e conjuntamente possibilitam um enfoque subjetivo, integrando na solução do problema todas as características necessárias, tanto quantitativas como as qualitativas. Essa metodologia, por um lado visa auxiliar no processo de escolher, ordenar ou classificar as ações potenciais e, por outro lado, busca incorporar múltiplos aspectos no processo, ao invés dos métodos monocritérios da pesquisa operacional tradicional (COSTA *et al.*, 2012; GOMES *et al.*, 2012).

Nesse âmbito, percebe-se a necessidade de fundamentar sobre a utilização de um modelo multicritério de apoio à decisão para análise de criticidade na gestão da manutenção de processos industriais, face aos métodos tradicionais de análise de criticidade. Essa fundamentação busca avaliar e ponderar os múltiplos aspectos e fatores envolvidos relacionados à determinação da criticidade de equipamentos e processos. Um modelo multicritério tem o potencial de tornar flexível o processo de análise de criticidade com a inclusão ou exclusão de critérios, o que permitirá uma maior confiabilidade nos dados analisados.

1.2 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem por objetivo geral propor um modelo multicritério de apoio a decisão para análise e determinação de criticidade de equipamentos em processos industriais.

Os objetivos específicos são:

- apresentar o estado da arte dos métodos tradicionais para determinação de criticidade em sistemas industriais;
- analisar e apresentar aplicações de métodos multicritérios em problemáticas específicas de manutenção;
- desenvolver a proposição de um modelo multicritério de análise de criticidade para classificação e ordenação de equipamentos industriais;
- descrever uma aplicação do modelo de apoio à decisão multicritério de análise de criticidade, na classificação e ordenação dos componentes críticos de um sistema industrial;
- comparar resultados de aplicação do modelo proposto com as ferramentas tradicionais utilizadas;
- apresentar e discutir os resultados dessa aplicação.

1.3 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Gil (2002) esta pesquisa tem a seguinte classificação metodológica:

Quanto à natureza pode ser definida como aplicada, pois o seu objetivo é gerar conhecimento para aplicação prática com foco na classificação e ordenação de equipamentos críticos na área de manutenção industrial.

Quanto aos objetivos pode ser classificada como uma pesquisa explicativa, já que busca identificar os fatores (critérios, contexto de decisão, problemática) que possuem relação direta com a criticidade de sistemas industriais.

Quanto à forma de abordagem pode-se classificar esta pesquisa com um enfoque qualitativo, pois mesmo que o modelo multicritério proposto utilize dados quantitativos e análise matemática, o seu foco consiste em entender o fenômeno da classificação e ordenação de equipamentos críticos, observando o contexto envolvido, o ponto de vista dos participantes e as interações existentes nesse meio.

Quanto à área de ciência, o estudo é classificado como metodológico, pois apresenta um modelo (metodologia) que tem o objetivo de aperfeiçoar e sistematizar o processo de análise de criticidade de equipamentos industriais.

O modelo proposto é resultado da integração das seguintes áreas: gestão da manutenção (com foco na criticidade de equipamentos); metodologias multicritério de apoio à decisão (Métodos de Sobreclassificação); e Apoio a decisão multicritério na manutenção industrial, conforme apresenta a figura 1.

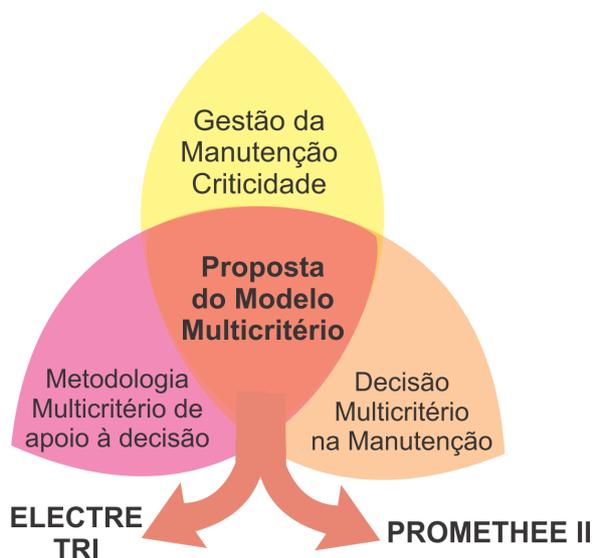


Figura 1 – Áreas de integração do trabalho
Fonte: Autor (2015)

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho está desenvolvido nas seguintes etapas:

1. **Análise de Criticidade na Manutenção:** Compreende o processo de análise de criticidade de equipamentos industriais, observando os métodos tradicionais empregados e os fatores que influenciam no processo de análise;
2. **Metodologias multicritério de apoio à decisão:** Esta etapa consiste em uma pesquisa bibliográfica sobre Apoio Multicritério a Decisão, que analisa os diferentes métodos existentes e selecionar o(s) mais aquedado(s) para aplicação em problemas que objetivem a determinação da criticidade de equipamentos industriais;
3. **Métodos Multicritérios empregados na Manutenção:** Descreve as principais aplicações envolvendo métodos multicritérios em problemáticas específicas da manutenção. Esta etapa fornece a base conceitual para

aplicação, além dos critérios e modelagens usualmente empregadas nesses modelos;

4. **Construção de modelo multicritério para definição de criticidade:** Apresenta o desenvolvimento de um modelo para representar a problemática em questão, com identificação dos métodos a serem empregados, critérios fundamentais, modelagem de preferência dos decisores e demais etapas necessárias, a fim de operacionalizar uma aplicação;
5. **Aplicação do Modelo:** Utiliza uma aplicação numérica do modelo em um problema industrial característico com objetivo de avaliar os resultados alcançados com o modelo;
6. **Considerações sobre o modelo:** Compara o modelo com métodos tradicionais empregados na definição da criticidade, avaliar os resultados e realizar análise de sensibilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos que fundamentam o desenvolvimento do trabalho de pesquisa, com ênfase nos principais conceitos relacionados ao modelo proposto. Inicialmente são apresentadas afirmações sobre a importância da análise de criticidade para equipamentos e processos industriais sob a ótica da gestão da manutenção.

Na sequência são apresentadas discussões sobre os métodos tradicionais utilizados na determinação de equipamentos críticos e análise de criticidade dos processos industriais, com uma breve descrição operacional e observados os critérios e parâmetros utilizados em cada método.

Para a construção do modelo proposto são explorados os conceitos fundamentais do processo de apoio à decisão multicritério, através descrição dos processos, problemáticas e métodos multicritérios de sobreclassificação, com foco nos métodos utilizados no trabalho.

São abordadas também algumas das principais aplicações de métodos multicritérios na gestão da manutenção industrial, com ênfase em problemas de criticidade e priorização de sistemas, presentes na literatura, procurando detectar as principais relações com o modelo proposto, natureza do problema e critérios utilizados.

2.1 ANÁLISE DE CRITICIDADE

Sistemas industriais são planejados, operados e mantidos com intuito de produzir a fim de satisfazer as necessidades dos clientes, através de elevado nível de qualidade no produto final, seja ele um produto ou serviço. No decorrer do tempo de operação da produção, algumas falhas podem ocorrer, o que pode comprometer o desempenho e o atingimento ao objetivo inicial de um sistema. Isso torna necessária a adoção de uma política correta de manutenção para restaurar o desempenho do sistema a um nível desejado (MOHIDEEN et al., 2011; WANG & PHAM, 2011).

Para Liu e Huang (2010) e Nguyen *et al.* (2013) a manutenção é fundamental para o desempenho e a confiabilidade dos sistemas industriais, a fim de assegurar a eficiência na utilização e o desempenho desses sistemas, contudo, em muitos casos,

torna-se impossível executar todas as ações de manutenção devido às limitações de recursos, tempo e complexidade dos processos. Nesses casos a análise de criticidade é indicada na priorização dos sistemas e equipamentos críticos, considerando interações entre processos, modelos de confiabilidade, as variações dos parâmetros e características operacionais de um processo (TOMAIDIS & PISTIKOPOULOS, 2004).

Para Moss e Woodhouse (1999) a definição de "criticidade" pode ter diferentes interpretações, dependendo do objetivo e contexto no qual ela é analisada. Helmann (2010) ressalta a criticidade como o atributo que expressa a importância da função de um equipamento ou sistema dentro de um processo produtivo, sob os aspectos de segurança, qualidade, meio ambiente ou outros critérios específicos.

Ribeiro (2010) e Aven (2009) afirmam que a criticidade determina o quanto um equipamento pode ser fundamental dentro do contexto operacional de um sistema, onde uma falha ou baixo desempenho podem acarretar graves consequências, como acidentes com pessoas, danos ambientais, impactos econômicos e operacionais. Assim, a criticidade é diretamente proporcional ao impacto que esse equipamento pode causar no processo.

Hijes e Cartagena (2006) observam a importância da manutenção ao devolver o conceito de "confiabilidade perdida em um sistema". Os autores destacam que quanto mais crítico for o equipamento para um sistema, maior deve ser o foco da manutenção sobre ele. Assim, a análise de criticidade torna-se um ponto de partida na priorização dos recursos da manutenção para aumentar o nível de manutenção necessário em cada sistema.

A análise de criticidade é uma técnica que identifica e classifica efeitos e eventos potenciais baseados nos impactos e na importância dos itens para o processo. Essa análise pode posteriormente ser aplicada concomitantemente com estudos de risco e de confiabilidade de projetos, aliada também aos aspectos ambientais e de segurança (MOSS & WOODHOUSE; 1999; SMITH & HAWKINS; 2004).

Wessels e Sautter (2009) reforçam que análise de criticidade fornece meios para quantificar os efeitos da ausência da função de um componente, equipamento ou sistema em relação a toda a produção, sendo conduzida de forma qualitativa ou quantitativa.

A abordagem quantitativa consiste na obtenção de um número crítico a partir das taxas de falhas, taxa dos modos de falhas, taxas de efeitos das falhas com valores conhecidos e confiáveis, conforme documentos da MIL-STD-1629A e IEC 60812, onde são apresentados métodos e fórmulas para utilização dessa abordagem (LEE *et al.*, 2011).

O método qualitativo é utilizado quando não há dados disponíveis sobre as falhas, sendo necessário classificar a criticidade de forma subjetiva com base no conhecimento tácito da equipe de análise, comumente aplicada em instalações em comissionamento, contudo conforme o sistema entre em seu regime normal de operação, recomenda-se a coleta de dados e a utilização de métodos quantitativos (IEC, 2006).

2.2 MÉTODOS APLICADOS NA ANÁLISE DE CRITICIDADE

Na gestão da manutenção métodos como a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA) e Análise Crítica dos Modos de Falha e Efeitos (FMECA) são utilizados para análise de criticidade de equipamentos e processos industriais. Esses métodos são criados decorrentes de pesquisas ou até adaptados para necessidades específicas de um segmento industrial, sob a forma de ferramentas específicas para análise ou integradas umas as outras em programas de manutenção. Siqueira (2009) observa que grande parte das empresas utilizam métodos empíricos na avaliação da criticidade, baseados na experiência dos gestores e técnicos de manutenção, que apesar de servir de referência no planejamento de atividades e recursos, não oferecem uma avaliação completa, que contemple diferentes aspectos e cenários, que abordam uma visão global do sistema, com destaque as seguintes áreas: segurança, meio-ambiente, produção, qualidade e outros departamentos necessários. A seguir são apresentados alguns dos mais importantes métodos utilizados para análise de criticidade em sistemas industriais.

2.2.1 Número de risco

A avaliação do número de risco, do inglês *Risk Priority Number* (RPN), é uma ferramenta que analisa os riscos presentes em falhas potenciais, com objetivo de focar a priorização das atividades de manutenção (JIAN-MING *et al.*, 2011).

Segundo a IEC 60300 (2006) risco pode ser definido como a probabilidade de um evento ocorrer, ou a frequência no qual o mesmo ocorre combinado ao efeito desse evento. Hokstad e Trygve (2006) definem risco como a possibilidade de ocorrência de todos os eventos e condições indesejadas.

A avaliação do RPN pode ser realizada através da equação 1, ou quando utilizado o nível de detecção pela equação 2 (IEC, 2006; HUADONG & ZHIGANG, 2011):

$$RPN = S \times F \quad (1)$$

$$RPN = S \times F \times D \quad (2)$$

Nas equações (S) representa a severidade da falha, (F) a frequência da falha e (D) sua detectibilidade.

2.2.2 Classificação ABC

O *Japan Institute of Plant Maintenance* - JIPM (1995) recomenda a utilização da classificação ABC, como uma ferramenta para avaliar a criticidade de uma máquina ou sistema dentro de um processo industrial, mediante a utilização de um fluxograma orientado para a decisão, conforme apresentado na figura 2.

No fluxo o sistema é avaliado mediante os critérios escolhidos pelos responsáveis pela análise, através de perguntas que direcionam a avaliação do sistema, com a inserção do ativo em três classes críticas (A, B ou C).

Ao final da análise a manutenção será orientada a cada sistema ou equipamento com base na sua classificação (JIPM, 1995; SIQUEIRA; 2009):

- Classe A: Equipamentos altamente críticos para o processo. Nessa classe é fundamental uma política preventiva, com utilização de algumas dessas técnicas: preditiva e preventiva, análise das falhas manutenção e operação, equipes de melhoria focada, equipes

focadas na redução de falhas, aplicação de metodologias RCM ou FMECA.

- Classe B: Equipamentos importantes para o processo. Classe onde é aceitável aplicação de alguma das seguintes técnicas: preventiva ou preditiva, equipes e times de melhoria, análise das falhas pela manutenção.
- Classe C: Equipamentos com baixo impacto no processo, com as seguintes políticas de manutenção: corretiva, preditiva e/ou preventiva em equipamentos utilitários, monitoramento de falhas para evitar recorrências.

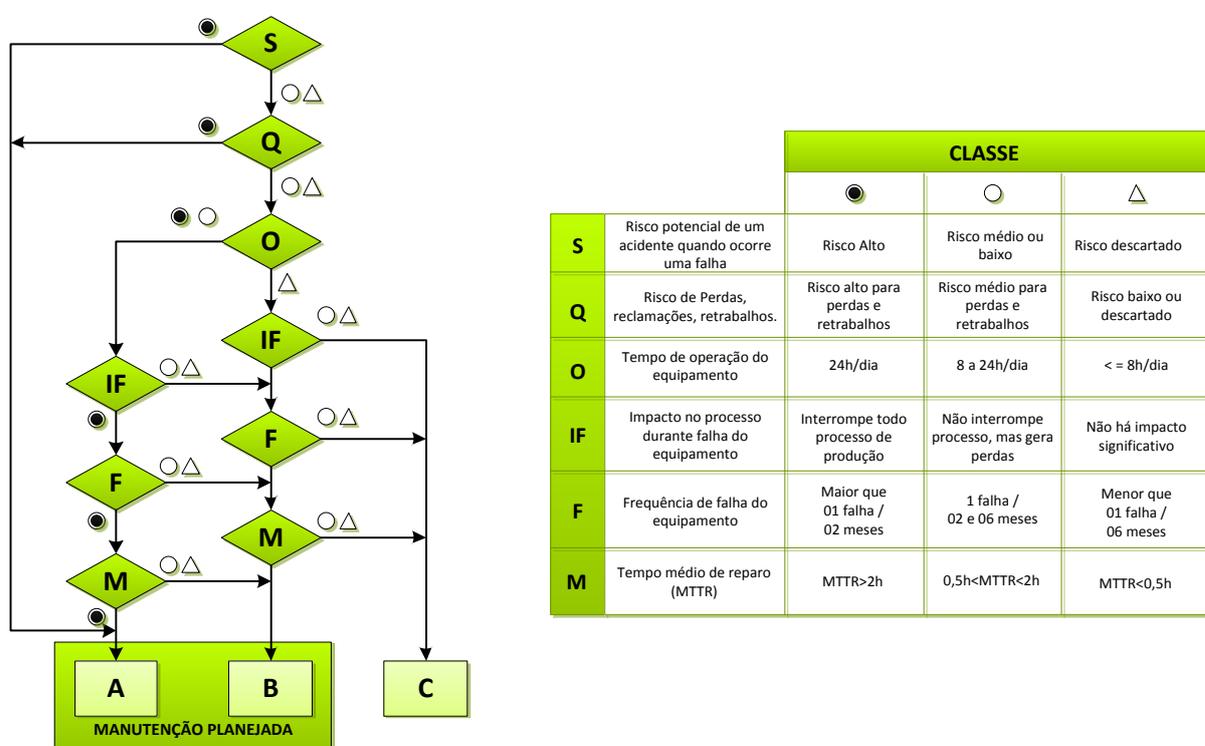


Figura 2 – Classificação ABC (Critérios e Fluxo Decisional)
Fonte: JIPM (1995)

2.2.3 Manutenção Centrada em Confiabilidade

A Manutenção Centrada em Confiabilidade, do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM), é uma abordagem de manutenção, com origem da indústria aeronáutica e militar americana no fim da década de 60, que prioriza as ações da manutenção para sistemas e equipamentos onde a confiabilidade é fundamental, além

de focar em aspectos como desempenho, segurança, meio-ambiente e financeiro (MOUBRAY, 1997; WANG e HWANG, 2004).

Igba *et. al* (2013) afirmam que o objetivo da MCC é preservar a função mais importante do equipamento ou sistema, assegurar a confiabilidade e disponibilidade necessária com o menor custo possível. Segundo Garza (2002) a MCC disponibiliza uma estratégia eficiente de manutenção, com redução e/ou eliminação dos efeitos e consequências de uma falha, baseadas nas necessidades do processo produtivo e não do equipamento ou sistema, conforme abordagem tradicional de manutenção. Contudo, Rausand (2008) ressalta que a MCC não aumenta e nem melhora a confiabilidade do sistema, e sim apenas assegura a realização da confiabilidade que lhe é inerente, com equilíbrio de custos e benefícios na obtenção de um programa eficaz de manutenção preventiva (PM).

A metodologia MCC é baseada em etapas dispostas em uma sequência estruturada, com ferramentas de análise e modelagem que respondem as seguintes perguntas sobre o sistema a ser analisado (MOUBRAY, 1997; RAUSAND, 2008):

1. Quais são as funções e os padrões de desempenho que devem estar presentes no contexto de operação do sistema?
2. Em que aspecto a função do sistema não é realizada?
3. O que ocasiona a falha do sistema?
4. O que acontece quando a falha se apresenta?
5. De que modo cada falha afeta o sistema?
6. O que pode ser feito para prever ou prevenir a ocorrência dessas falhas?
7. O que deve ser feito caso as ações selecionadas não apresentem eficácia?

A literatura apresenta diversos processos de implantação para a MCC, Nowlan & Heap (1978); Moubray (1997); NAVSEA (2007); Smith & Hinchcliffe (2004), os quais variam de acordo com o contexto de aplicação, tipo de análise, modelos utilizados como base, maturidade da equipe de análise, entre outros (SIQUEIRA, 2009).

As etapas comuns e aceitas na grande maioria dos modelos de aplicação são (MOUBRAY, 1997; SMITH e HINCHCLIFFE, 2004):

- Etapa 1: Identificação das Funções do Sistema;
- Etapa 2: Análise dos Modos de Falha e Efeitos;

- Etapa 3: Seleção das Funções Significantes;
- Etapa 4: Seleção das Atividades Aplicáveis;
- Etapa 5: Avaliação da Efetividade das Atividades;
- Etapa 6: Seleção das Atividades Aplicáveis e Efetivas;
- Etapa 7: Definição da Periodicidade das Atividades.

Leverette (2006) divide a aplicação da MCC em quatro macros etapas, nas quais destaca os processos de análise, ferramentas e relacionamentos possíveis presentes no processo de implantação, conforme ilustrado na figura 3.

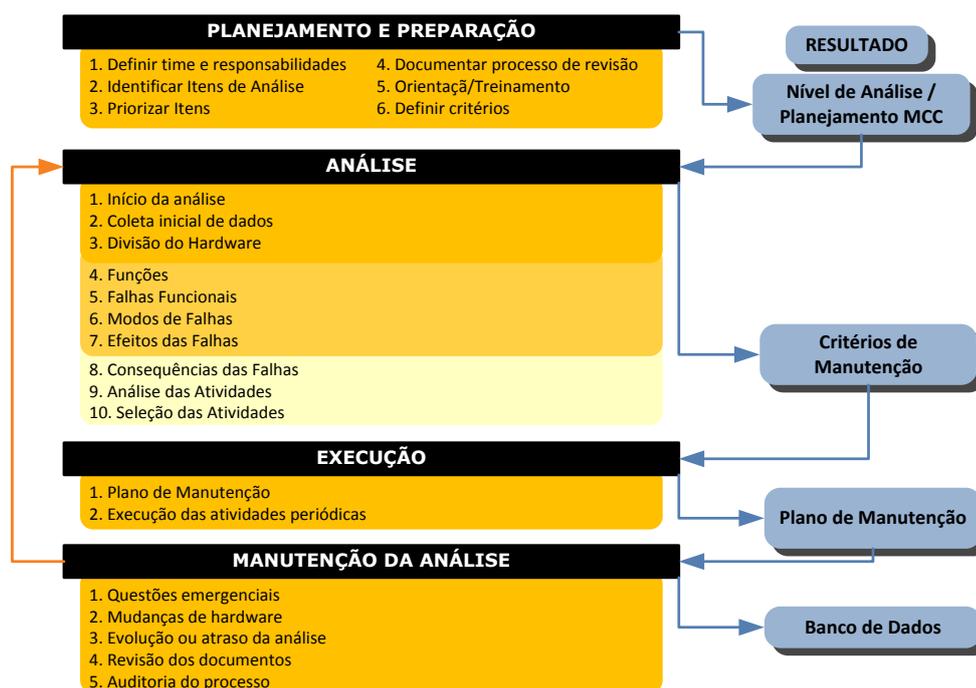


Figura 3 – Processo de Implantação MCC
 Fonte: Leverette (2006)

Cheng *et al.* (2008) sintetizam o resultado de cada fase em:

- **Identificação das funções significativas:** Identificar as funções críticas dos itens e sistemas, subsistemas e componentes, cuja sua ausência seja refletida em impactos econômicos, financeiros, operacionais e riscos ao meio-ambiente e a segurança;
- **Análise dos modos de falha e efeitos (FMEA):** identificar as falhas funcionais, em cada nível do sistema ou processo em questão, as falhas presentes em cada nível, seus modos de falha, efeitos e causas, e suas relações nos demais níveis do sistema;
- **Decisão lógica da MCC:** após identificação das causas das falhas funcionais, são selecionadas, através de ferramentas presentes na

metodologia, as tarefas aplicáveis de manutenção e sua periodicidade;

- Combinar, desenvolver e atualizar a política de preventiva: atualizar baseado no resultado da aplicação da MCC a política de manutenção, com introdução de novas técnicas e metodologias a fim de melhorar o resultado pós implantação da MCC.

2.2.4 Parâmetros para Avaliação de Criticidade

Segundo Hijes e Cartagena (2006) a maioria das plantas industriais é equipada com diversos equipamentos em uma sequência de operação, onde as saídas de um equipamento ou processo podem ser as entradas para um equipamento ou processo subsequente. Tais equipamentos apresentam diferentes requisitos para confiabilidade, segurança, tecnologias de fabricação, e efeitos de falha sobre o processo produtivo em que estão inseridos, com a necessidade de determinação um maior ou menor nível de criticidade dentro do sistema como um todo.

Monitorar a criticidade de todos os equipamentos de uma planta industrial é fundamental para uma boa política de manutenção. Isso define onde e como será direcionada a atuação da manutenção em cada equipamento, o que garante a distribuição e o gerenciamento de recursos de maneira eficaz e contribui para o aumento do desempenho da empresa (HORENBEEK & PINTELON, 2010; RIBEIRO, 2010).

Siqueira (2009) e Ribeiro (2010) observam que em grande parte das plantas industriais não há uma seleção adequada dos parâmetros que afetam a criticidade dos equipamentos, sendo a criticidade do equipamento baseada apenas na experiência e conhecimento tácito do técnico ou responsável pela análise, acrescida de informações técnicas sobre o mesmo.

Informações puramente técnicas não são suficientes para determinar a criticidade de um equipamento. Devem ser acrescentados outros critérios como: relações interfuncionais entre equipamentos-processo; risco derivado do potencial de falha; impactos financeiros, políticas ambientais; segurança; aspectos econômicos; qualidade, além de critérios específicos de cada segmento industrial (SIQUEIRA, 2009; HORENBEEK & PINTELON, 2010).

A seguir são apresentados os principais grupos de critérios aplicados na análise de sistemas e componentes críticos industriais:

(i) Critérios de segurança e meio-ambiente

É cada vez maior a preocupação da sociedade com aspectos ambientais e de segurança, onde só os avanços econômicos e tecnológicos não são tolerados em detrimento a esses aspectos. Negligenciar a importância desses aspectos pode inclusive denegrir a imagem da empresa na comunidade onde ela está inserida. Mobley (2008) destaca que a segurança é um dos aspectos mais importantes da gestão industrial contemporânea.

Moubray (1997) e Siqueira (2009) definem que um equipamento é crítico do ponto de vista da segurança ou meio-ambiente quando falhas ou defeitos gerados por esse equipamento ameacem a vida de colaboradores, ameacem de forma coletiva a sociedade ou infrinjam uma lei ou norma ambiental.

(ii) Critérios econômicos/financeiros

Qualquer empreendimento industrial está sujeito a impactos financeiros, mesmo aqueles em que o objetivo principal não é a geração de lucros (militares, assistenciais), os quais podem sofrer impactos decorrentes de variações econômicas. Os custos envolvidos em atividades industriais são classificados em (KARDEC & NASCIF; 2009):

- Custos de produção: decorrentes de perda de produção ou qualidade do produto, causados por falhas ou perda de desempenho dos equipamentos e instalações;
- Custos diretos: recursos necessários para manter a função dos equipamentos, como preventivas, preditivas, reparos e atividades de manutenção em geral; e,
- Custos indiretos: decorrentes de necessidades administrativas da produção e manutenção, como gerenciamento, supervisão, projetos, entre outros.

Moubray (1997) destaca que as características presentes em equipamentos com impactos econômicos: (i) capacidade de alterar a produção; (ii) impacto na qualidade do produto; (iii) reclamações de clientes; (iv) afetar eficiência do processo; (v) consumo demasiado de recursos (eletricidade, água, matéria-prima).

(iii) Critérios de produção e qualidade

Equipamentos e sistemas cujas falhas tenham a capacidade de afetar a produção, qualidade do produto e processo possuem grande relevância sobre na análise de criticidade por parte dos gestores, principalmente por impactarem financeiramente na organização.

De acordo com Ribeiro (2010) equipamentos críticos dentro do contexto de produção são aqueles que: (i) apresentam avarias frequentes; (ii) não possuem sobressalentes; (iii) impacto na entrega da produção ou redução da capacidade produtiva; (iv) afetam qualidade do produto ou processo; (v) provocam danos ao equipamento ou processo e; (vi) apresentam falhas intermitentes.

(iv) Critérios de Manutenção

Disponibilidade pode ser definida como a probabilidade de um equipamento ou sistema estar disponível, em condições específicas, quando necessário ou em dado período de tempo (DHILLON, 2006; BS EN 13306, 2001). Para conhecer a disponibilidade do equipamento, faz-se necessário identificar o impacto na ausência da sua função representará na produção (MOBLEY, 2008).

Na literatura são apresentadas várias formas para o cálculo da disponibilidade, adaptadas em função do autor e do contexto de aplicação, contudo a forma mais difundida é apresentada na equação 3 (SMITH, 2001):

$$D = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (3)$$

onde:

MTBF – *Mean Time Between Failures*, representa o tempo médio entre falhas, definido pela razão entre o tempo disponível de máquina sobre o número de ações corretivas menos “uma unidade”;

MTTR – *Mean Time to Repair*, expressa o tempo médio necessário para reparo do ativo após uma falha.

Algumas aplicações consideram a utilização do indicador MDT, *Mean Down Time*, o qual representa o tempo médio de indisponibilidade do equipamento ou sistema, definido pela soma de todos os tempos necessários na manutenção e restabelecimento do sistema a um nível desejado de operação.

Os indicadores MTTR e MDT apresentam um contexto similar, já que ambos indicam um período de indisponibilidade do sistema, contudo no cálculo do MTTR não são considerados tempo de *setup* e ajustes de produção, sendo estes computados pelo MDT (FILHO, 2008).

Apesar de apresentarem um conceito simples, estes indicadores são vitais para o planejamento da manutenção, pois mesmo que um ativo apresente um número reduzido de falhas, com uma excelente confiabilidade, um valor elevado no MTTR irá reduzir drasticamente a disponibilidade do mesmo.

Confiabilidade é a probabilidade de um equipamento ou sistema cumprir sua função, dentro de padrões de desempenhos definidos para um dado intervalo de tempo (DHILLON, 2006). Gutiérrez (2005) ressalta a existência de quatro características que definem a confiabilidade de um ativo, sendo elas:

(i) probabilidade – relação entre o número de casos favoráveis e possíveis durante um intervalo de tempo;

(ii) Função requerida ou satisfatória – limite operacional no qual o desempenho do sistema ou equipamento está abaixo do nível especificado de sua função;

(iii) período de tempo – variável aleatória para definição da confiabilidade, remetendo ao tempo de funcionamento ou ciclo de vida; e,

(iv) condições de operação – condições quem que o equipamento ou sistema irá desempenhar sua função, como localização, condições do ambiente, estado da matéria prima, entre outros.

A equação 4 apresenta a fórmula para calcular a confiabilidade.

$$\mathbf{R(t) = e^{-\lambda t}} \quad (4)$$

onde:

R(t) – confiabilidade do equipamento para dado instante t ;

e – base dos logaritmos neperianos (2,718);

λ – taxa de falhas do item, expressa pela relação entre o número de falhas e número de horas em operação;

t – tempo previsto de operação.

A IEC (2006) indica que a frequência com que o ativo apresenta uma falha, influenciará a criticidade do mesmo dentro do processo em questão. Campbell e

Jardine (2001) observam que a frequência de falha fornece uma informação comparativa do ativo, pois informa a potencialidade de falhas do equipamento.

Para estimar a frequência das falhas de um equipamento, pode-se utilizar sua taxa de falhas, ou no caso de ausência desta informação, os técnicos de manutenção e especialistas do equipamento podem determinar a frequência de falhas através de sua experiência, dados de produção, históricos e controle da manutenção, através da equação 5 (SIQUEIRA; 2009; CAMPBELL & JARDINE, 2001):

$$BF = \frac{NB}{TT-DT-NT} \quad (5)$$

onde:

BF: frequência de falhas;

NB: número de falhas (*number of breakdown*);

TT: tempo total de operação;

DT: tempo de parada do equipamento (*downtime*);

NT: tempo sem operação (*non utilized time*).

A tabela 1 fornece um nível de frequência através da utilização da taxa de falha:

Tabela 1 – Frequência da falha

Nível	Frequência da Falha	Taxa de Falhas	Descrição
6	Muito alta	$\geq 1/10$	Taxa de falha muito alta
		1/20	Ocorre continuamente
5	Alta	1/50	Taxa de falha elevada
		1/100	Ocorre com frequência
4	Moderada	1/200	Taxa moderada
		1/500	Falha ocorre ocasionalmente
3	Ocasional	1/1000	Falha ocasional
		1/2000	Falha razoavelmente esperada
2	Baixa	1/5000	Taxa de falha baixa
			Falha ocorrerá excepcionalmente
1	Remota	1/10000	Probabilidade remota de ocorrer Sugerido esperar que não ocorra

Fonte: Headquarters (2006, p.17)

2.3 APOIO A DECISÃO MULTICRITÉRIO

Decisões estão presentes no cotidiano dos seres humanos, onde se faz necessário tomar preferência por uma alternativa considerando o cenário que é apresentado e os diferentes aspectos envolvidos no problema, sendo quase uma ação inerente da natureza humana. Contudo, a tomada de decisão pode ser apresentada como um cenário extremamente complexo, que envolve diferentes alternativas de ações, pontos de vistas distintos entre os decisores, critérios específicos de avaliação, o que contribui para que múltiplos critérios concorram entre si.

Para Gomes *et al.* (2012) os problemas complexos de decisão são comuns a várias áreas (econômica, engenharia, produção, políticas, sociais) presentes em uma infinidade de atividades, sejam elas públicas ou privadas e, em grande parte dessas situações caracterizadas pela existência de vários objetivos ou “desejos” a serem atingidos.

A metodologia de apoio à decisão multicritério acorda as decisões referentes à seleção da melhor alternativa dentro de um conjunto com várias alternativas potenciais para solução do problema, sujeitas a vários atributos ou “critérios” tangíveis ou intangíveis, com a capacidade de fornecer um tratamento específico às particularidades do problema (CHO, 2003).

Dentro do cenário industrial, Chareonsuk *et al.* (1997) destacam que as atividades de manutenção são influenciadas por diferentes critérios que dependem de características operacionais; filosofia de produção, demanda, ramo de atividade, entre outros. Gomes *et al.* (2012) definem que um problema complexo possui as seguintes características:

- Mínimo de dois critérios conflitantes entre si;
- Critérios e alternativas não definidas corretamente, nem consequências da priorização das alternativas em relação a algum critério;
- Critérios e alternativas conectados entre si, onde um critério parece inferir, em certo grau, em outro, assim como a escolha de uma alternativa depende da escolha ou exclusão de outra;
- Solução depende de vários decisores, cada um com um ponto de vista distinto do cenário e dos aspectos que envolvem o problema;

- Não há uma definição clara das restrições;
- Critérios quantitativos e outros qualitativos ou quantificáveis por julgamento de valor;
- Escalas dos critérios variando em função dos dados disponíveis e da natureza de cada critério;

Roy (1996) define apoio à decisão como uma atividade que contribui para os atores do processo de tomada de decisão a encontrar a melhor resposta. Para Zeleny (1986) a tomada de decisão é um esforço com objetivo de auxiliar o processo de decisão para a melhor solução, a qual é dificultada na presença de critérios conflitantes.

2.3.1 Fases do Processo de Decisão

Gomes *et al.* (2012) dividem o processo de decisão em seis etapas: (i) análise e identificação do problema; (ii) desenvolvimento de alternativas; (iii) comparação entre alternativas; (iv) classificação dos riscos; (v) seleção da melhor alternativa; e (vi) execução e avaliação. Tsoukiàs (2008) sintetiza o processo de decisão nas fases descritas a seguir:

(i) situação problema: nesta fase o foco está na identificação do problema buscando responder os seguintes questionamentos: quem possui o problema? porque a situação é um problema? quem são os decisores sobre o problema? qual o compromisso do cliente? quem estará sujeito às consequências?

(ii) formulação do problema: nesta fase através da estruturação do problema, o processo de decisão é identificado pelos decisores que formalizam o problema existente, onde poderão ser aplicados os métodos já existentes em teoria da decisão;

(iii) modelo de avaliação: durante esta fase o analista irá processar as informações através de algum modelo formal de decisão. Dentro da perspectiva do modelo multicritério, aqui são identificados os critérios e parâmetros juntos ao decisor. Os modelos de avaliação devem ser validados sobre os aspectos de sua conceitualidade, consistência lógica, resultados experimentais e sua operacionalidade;

(iv) recomendação final: na etapa final, a linguagem formal da decisão deverá ser traduzida para a linguagem corrente do decisor, com destaque para os seguintes elementos: certeza da aplicabilidade do modelo por parte do analista; ciência do

decisor de que o modelo irá representá-lo e que refletirá suas conclusões; a alternativa deve ser legitimada para o processo de decisão.

2.3.2 Atores

Roy e Vanderpooten (1997), Gomes *et al.* (2012) apontam que os agentes em qualquer processo de tomada de decisão são o decisor e o analista da decisão, onde o decisor pode ser uma pessoa ou um grupo de pessoas responsáveis pelo processo de tomada de decisão. O termo “atores” é constantemente associado ao decisor, facilitador e analista, e conceitua-os como:

(i) decisor: infere no processo decisório baseado em seu juízo de valor e/ou relações que estabelece, onde essas relações podem ser modificadas durante o processo de decisão com acréscimo de informações ou por influência dos facilitadores;

(ii) facilitador: líder com a responsabilidade de focar suas ações no processo de solução do problema, o qual deve possuir experiência no contexto do problema em questão. Deve elucidar e sistematizar o processo de avaliação necessário à tomada de decisão e manter-se neutro durante este processo. Roy (1996) ressalta que o facilitador deve se separar do seu juízo de valor, de forma a não interferir na decisão dos demais envolvidos;

(iii) Analista: responsável por analisar e auxiliar facilitadores e decisores a estruturar os problemas, identificar os fatores externos e do ambiente que irão inferir na sua evolução, estruturação e resolução do problema.

(iv) *Stakholder*: qualquer grupo ou indivíduos que possuam alguma implicação com o problema ou possam ser afetados pelo mesmo. Os *stakholders* apresentam um interesse direto na solução do problema, contudo não participam ativamente do processo de decisão.

2.3.3 Problemáticas

No processo de tomada de decisão, a melhor solução para um determinado problema é identificada entre as seguintes problemáticas (ROY, 1996):

(i) Problemática (P_α): visa apoiar a decisão pela escolha da melhor alternativa dentro de um subconjunto com a máxima restrição possível e seu resultado é uma escolha ou um procedimento de seleção;

(ii) Problemática (P_β): classificação das alternativas, dentro de categorias definidas *a priori*, mediante normas estabelecidas para o conjunto de ações, para elucidar a decisão mediante a triagem das alternativas alocadas. Resulta de uma triagem ou procedimento de classificação;

(iii) Problemática (P_γ): ordenação, completa ou parcial, das alternativas, através do reagrupamento em classe de equivalência de todas as ações. Resulta de um arranjo ou procedimento de ordenação;

(iv) Problemática (P_σ): elucidar a decisão pela descrição de cada ação e sua respectiva consequência. Resulta de uma descrição ou um procedimento cognitivo.

Gomes *et al.* (2012) observam que as problemáticas podem ser utilizadas em conjunto, e que a solução de um problema do tipo P_α ou P_β , pode ser baseada em uma ordenação P_γ .

2.4 MÉTODOS MULTICRITÉRIO

Roy (1985) classifica os métodos multicritérios em função do tipo de abordagem utilizada:

Abordagem critério único síntese – Pontos de vistas distintos são agregados em uma função única de síntese, de forma aditiva, empregada quando se trabalha com critérios do tipo compensatório. Os principais modelos desta categoria são a Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multiattribute Utility Theory* – MAUT) e a Análise Hierárquica de Processos (AHP);

Abordagem de métodos interativos – Utiliza métodos interativos (alternação entre etapas de cálculo, que fornecem soluções de compromissos, e etapas de diálogo, as quais representam dados extras sobre a preferência dos decisores) para elucidar as alternativas e atingir os objetivos dos decisores;

Abordagem sobreclassificação – em primeiro lugar utilizam uma relação de sobreclassificação que representa a preferência dos decisores, para em seguida explorar essa sobreclassificação com objetivo de auxiliar os decisores na solução dos seus problemas. Dentro desta abordagem destacam-se os métodos da família ELECTRE e PROMETHEE.

A seleção do método multicritério deve ser realizada em razão das características do problema, tipo dos critérios, forma da modelagem de preferência, preferências do decisor e conhecimento do analista. Uma vez que foram identificadas na literatura as características e propriedades necessárias para avaliar a criticidade de um sistema industrial, é possível avaliar quais métodos podem ser aplicados no modelo proposto. Para seleção do método multicritérios, foram avaliadas as seguintes características:

- Solucionar problemas de hierarquia;
- Permitir o trabalho com informações subjetivas, em razão da avaliação de alguns critérios baseado somente na experiência dos analistas;
- Possua aplicabilidade comprovada na área de manutenção industrial;
- Trabalhe com critérios conflitantes;
- A avaliação seja baseada em uma comparação entre todos os componentes;
- A obtenção de parâmetros e modelagem seja inteligível a todos os decisores.

O termo superação (sobreclassificação) relaciona-se com as relações de preferência. Nesse contexto, o modelo proposto deve avaliar situações de preferência (forte ou fraca) e indiferença entre as alternativas. Em razão do exposto, e das características apresentadas, foram selecionados dois métodos de sobreclassificação para o modelo: o ELECTRE TRI, para classificar os itens em classes determinadas conforme sua criticidade, e o PROMETHEE II, que realizará a ordenação dos itens em cada classe estabelecida.

2.4.1 Família ELECTRE

O grupo de métodos ELECTRE (*Elimination at Choix Traduisant la Réalité*) são derivações da sua primeira aplicação, desenvolvida por Bernard Roy em 1965, nomeada como ELECTRE I. Os métodos ELECTRE baseiam-se no conceito de relações de superação, distinguidos em razão da problemática, quantidade de informações inter e intracritérios e relações de superação utilizadas em sua aplicação (GOMES *et al.*, 2004).

Gomes *et al.* (2004) ressaltam que os métodos ELECTRE utilizam um sistema de pesos para mensurar a importância de cada critério na visão do decisor, com o

objetivo de construir índices de concordância, utilizados na avaliação das vantagens de uma alternativa sobre as demais, e índices de discordância que medem as desvantagens de uma alternativa sobre as demais.

O quadro 1 apresenta as diferentes versões e características de cada método da família ELECTRE:

Quadro 1 – Versões dos métodos da família ELECTRE

Versão	Autor	Ano	Problemática	Tipo de Critério	Utilização de pesos
I	Roy	1968	Seleção	Simple	Sim
II	Roy e Bertier	1973	Ordenação	Simple	Sim
III	Roy	1978	Ordenação	Pseudo	Sim
IV	Roy e Hugonnard	1982	Ordenação	Pseudo	Não
IS	Roy e Skalka	1985	Seleção	Pseudo	Sim
TRI	Yu Wei	1992	Classificação	Pseudo	Sim

Fonte – Gomes et al. (2004)

ELECTRE I

Gomes *et al.* (2004) afirmam que o ELECTRE I esclarece a decisão através da escolha de um subconjunto, que apresenta a máxima restrição e contemple as melhores alternativas, com a construção das relações de sobreclassificação por meio da comparação entre pares das alternativas através de índices de concordância (C) e discordância (D), e limiares de concordância (p) e discordância (q).

Este método deve ser utilizado quando todos os dados numéricos estejam codificados em escalas numéricas com intervalos idênticos, de forma a fornecer meios de afirmar que “a supera b” nas condições seguintes: (ROY e BOUYSSOU, 1993):

Quando a coalizão concordante, identificada através do índice de concordância, apresentar força suficiente suportar que “a supera b”, através da equação 6.

$$C(aSb) = \frac{1}{p} \sum_{\{j: g_j(a) \geq g_j(b)\}} w_j \quad (6)$$

sendo:

$$W = \sum_{j=1}^n w_j \quad (7)$$

Não há discordância na superação da alternativa a sobre b, verificada através do índice de discordância. O índice de discordância corresponde à medida de

desvantagem da alternativa “a” em relação à alternativa “b”, calculado através da equação 8:

$$D(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(a) \geq g_j(b), \forall_j \\ \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(b) - g_j(a)] & \end{cases} \quad (8)$$

para:

$$\delta = \max_{c,d,j} [g_j(p) - g_j(q)] \quad (9)$$

onde δ representa a máxima diferença para qualquer critério.

A relação de sobreclassificação é válida se e somente se:

$$aSb \text{ se } \begin{cases} C_{(a,b)} \geq p \\ D_{(a,b)} \geq q \end{cases} \quad (10)$$

ELECTRE II

Desenvolvido por Roy e Bertier em 1973, este método é uma evolução do ELECTRE I, aplicado em problemáticas de ordenação ($P\gamma$). O ELECTRE II possui duas relações de superação, uma forte (S^F) e outra fraca (S^f), estabelecidas através de níveis de concordância distintos (p^0, p^*, q^0, q^*) onde (ROY e BOUYSSOU, 1993):

$$0 < p^0 < p^* < 1 \text{ e } 0 < q^0 < q^* < 1$$

Sobreclassificação Forte (S^F)

$$aS^F b = \begin{cases} C(a, b) \geq p^* \\ D(a, b) \leq q^* \\ \sum W^+ \geq \sum W^- \end{cases} \quad (11)$$

Sobreclassificação Fraca (S^f)

$$aS^f b = \begin{cases} C(a, b) \geq p^0 \\ D(a, b) \leq q^0 \\ \sum W^+ \geq \sum W^- \end{cases} \quad (12)$$

Nascimento (2012) sintetiza o procedimento de exploração do método nos seguintes passos:

- Partição do conjunto de alternativas A ;
- Construção de uma pré-ordem completa Z_1 da partição A ;
- Construção de outra pré-ordem completa Z_2 do resultado anterior e;
- Definição da pré-ordem parcial Z .

ELECTRE III

Aprimoramento do ELECTRE II criado com objetivo de trabalhar com dados imprecisos e mal determinados. Utiliza-se do conceito de pseudo-critérios ao invés de critérios verdadeiros, o que possibilita, em situações em que o decisor é incapaz de recusar ou comparar duas ações, estabelecer condições de indiferença e preferência, o que permite trabalhar com situações imprecisas e incertas (ROY, 1995; GOMES *et al.*, 2004).

Para construir a relação de superação é necessário definir o índice de credibilidade (ρ), responsável por validar a afirmação (aSb). Este índice é definido através dos índices de concordância e discordância para cada critério g_j . A definição do índice de discordância utiliza o limite de veto $v_j(g_j(a))$ onde a relação aSb é recusada se:

$$g_j(b) \geq g_j(a) + v_j(g_j(a)) \quad (13)$$

A definição do índice de credibilidade segue as seguintes premissas (NASCIMENTO, 2012):

- Na ausência de critérios discordantes, a credibilidade é igual ao índice de discordância;
- A imposição do poder de veto de um critério discordante anula o índice de credibilidade;
- Situações em que o índice de concordância é menor que o índice de discordância, torna o índice de credibilidade menor que o índice de concordância;

ELECTRE IV

Método criado para problemas de ordenação sem a utilização de pesos para os critérios, com procedimentos iniciais de modelagem similares ao ELECTRE III, com utilização de limites de preferência, indiferença e veto a cada critério. Definidos os limites anteriores, as situações de superação são construídas baseadas em relações de preferência fortes (S^F) e fracas (S^f) (VINCKE, 1992).

O ELECTRE IV utiliza cinco parâmetros, os quais estabelecem uma relação *fuzzy* de sobreclassificação de acordo com a relação entre as alternativas e critérios, sendo: Quasidominância (S_q), Dominância Canônica (S_c), Pseudodominância (S_p), Subdominância (S_s) e Vetodominância (S_v).

ELECTRE IS

Este método tem como objetivo selecionar um subconjunto de alternativas potenciais, sendo uma adaptação do ELECTRE I com utilização de lógica *fuzzy* e pseudocritérios. Além disso, o método emprega limites de preferência e indiferença não nulos e um reforço do poder de veto (FIGUEIRA, MOUSSEAU e ROY, 2005).

2.4.2 ELECTRE TRI

Apresentado por Yu (1992) e Mousseau e Slovinski (2000), o ELECTRE TRI permite a alocação de um conjunto de alternativas em categorias pré-definidas, com base na comparação da alternativa a com os limites de cada categoria, conforme figura 4 (FIGUEIRA, MOUSSEAU e ROY, 2005).

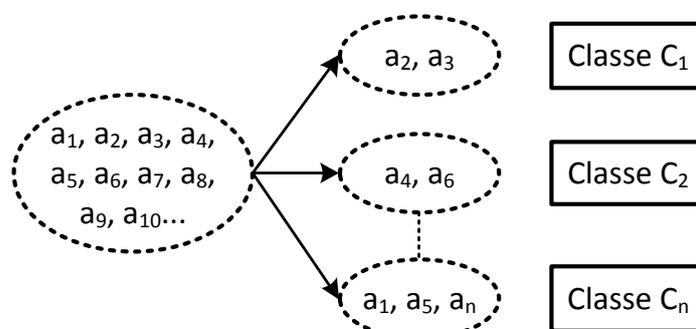


Figura 4 – Exemplo de modelagem do ELECTRE TRI
Fonte: Mousseau e Slovinski (2000)

Almeida (2011) observa que neste método consideram-se as avaliações das alternativas para cada critério $\{g_1, \dots, g_i, \dots, g_m\}$, um conjunto de índices de perfis $\{b_1, \dots, b_h, \dots, b_p\}$, onde então são definidas $(p+1)$ categorias, em que b_h representa o limite superior da categoria C_h e o limite inferior da categoria seguinte C_{h+1} , $h= 1, 2, \dots, p$. A figura 5 ilustra os limites entre categorias do método.

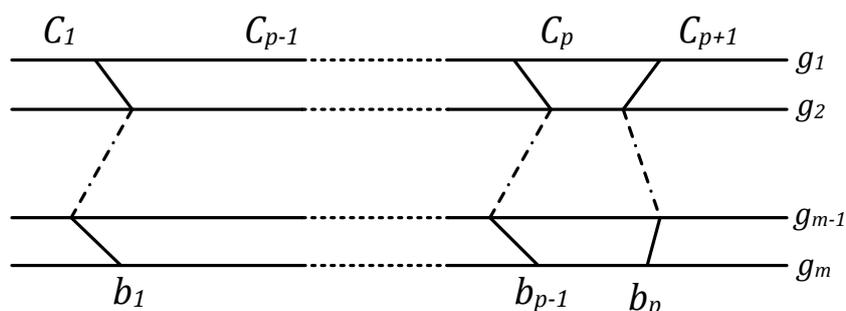


Figura 5 – Limites entre categorias
Fonte: Mousseau e Slovinski (2000)

Através de um pseudo-critério são definidas as preferências para cada critério (g) , onde os limites de preferência $p_j[g(b_h)]$ e indiferença $q_j[g(b_h)]$ formam as informações intra-critério, em que $q_j[g(b_h)]$ especifica a maior diferença $(g_j(a) - g_j(b_h))$, a qual preserva a indiferença entre alternativa “a” e “ b_h ” mediante o critério g_j , e $p_j[g(b_h)]$ representa a menor diferença $(g_j(a) - g_j(b_h))$, a qual é compatível com a preferência da alternativa “a” sobre “ b_h ” para o mesmo critério (MOUSSEAU e SLOVINSKI, 2000). A estrutura de preferência do método possibilita uma zona de hesitação, representada por uma preferência fraca, não permitindo uma mudança repentina entre uma preferência estrita a indiferença por parte do decisor.

Almeida (2011) destaca duas condições para validar a afirmação C :

- Concordância: a sobreclassificação aSb_h será aceita quando a maioria dos critérios forem de acordo com a afirmação;
- Não-discordância: quando a condição de concordância não existir, nenhum critério pode se opor a afirmação aSb_h .

Para construir a relação de sobreclassificação, o ELECTRE TRI utiliza-se de um conjunto de limiares de veto $(v_1(b_h), v_2(b_h), \dots, V_m(b_h))$, aplicados no teste de discordância, onde $(v_j(b_h))$ representa a menor diferença entre $g_j(b_h) - g_j(a)$ incompatível com a afirmação aSb_h . Os índices de concordância parcial $c_j(a,b)$,

concordância $c(a,b)$ e discordância $d_j(a,b)$ são calculados pelas equações 14, 15 e 16.

$$c_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \geq p_j(b_h) \\ 1 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \leq q_j(b_h) \\ p_j(b_h) + g_j(a) - g_j(b_h) & \\ \text{noutros casos } p_j(b_h) - g_j(b_h) & \end{cases} \quad (14)$$

$$c(a,b) = \frac{\sum_{j \in F} k_j c_j(a,b_h)}{\sum_{j \in F} k_j} \quad (15)$$

$$d_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \leq p_j(b_h) \\ 1 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \geq v_j(b_h) \\ g_j(b_h) + g_j(a) - p_j(b_h) & \\ \text{noutros casos } v_j(b_h) - p_j(b_h) & \end{cases} \quad (16)$$

Mousseau e Slovicinski (2000) observam a construção de um índice de credibilidade $\sigma(a,b_h) \in [0,1]$ que valida a afirmação aSb_h quando seu valor é maior ou igual ao nível de corte (λ), sendo $\lambda \in [0.5,1]$.

$$\sigma(a,b_h) = c(a,b_h) \cdot \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1-d_j(a,b_h)}{1-c(a,b_h)} \quad (17)$$

onde, $\bar{F} = \{j \in F: d_j(a,b_h) > c(a,b_h)\}$.

Após o cálculo dos índices, um nível de corte é aplicado $\lambda \in [0.5,1]$, o qual determina as relações de preferência mediante a condição: $p(a_k, b_h) \geq \lambda \rightarrow a_k S b_h$. desta forma pode-se afirmar que quanto maior for o valor de λ , mais rigorosa serão as condições de subordinação de um alternativa, o que contribui para a ocorrência de incomparabilidade entre as alternativas (FIGUEIRA *et al.*, 2005).

Desta forma, conforme Mousseau *et al.* (2001) e Almeida (2011) a alocação das alternativas nas categorias pode ser realizada de duas formas:

- **Procedimento pessimista:** consiste em comparar de forma sucessiva a alternativa “a” com b_i , para $i = p, p-1, \dots, 0, b_h$, com início no primeiro perfil, b_p (o maior b_h), tal que aSb_h , o que resulta na inclusão da alternativa “a” na categoria C_{h+1} ($a \rightarrow C_{h+1}$).
- **Procedimento otimista:** consiste em comparar de forma sucessiva a alternativa “a” com b_i , para $i = 1, 2, p, \dots, b_h$, com início pelo primeiro perfil,

b_1 (o menor b_h), tal que “ b_h ” seja preferível a alternativa “ a ”, com inclusão da alternativa “ a ” na categoria C_h ($a \rightarrow C_h$).

Se b_h é o primeiro valor limite, onde $a_k S b_h$, atribui-se a alternativa a_k a classe C_{h+1} . Sendo b_{h-1} e b_h os limites da classe C_h , esse procedimento aloca a_k à mais alta classe C_h , de forma que a_k sobreclassifica b_{h-1} ($a_k S b_{h-1}$). Já o procedimento otimista compara sucessivamente o valor de a_k sobre b_i , $i=1, 2, \dots, p$. Se b_h é o valor limite de forma que $b_h P a_k$, atribui-se a_k à classe C_h mais inferior, onde o valor do limite superior b_h é preferido a a_k ($b_h P a_k$).

Costa e Freitas (2005) observam que a compreensão do algoritmo do ELECTRE TRI exige um esforço adicional, visto que o receio em sua aplicação fundamenta-se em conceitos de lógica nebulosa (*fuzzy*), contudo ressaltam que entendimento e a modelagem do método dispensa a descrição pormenorizada do algoritmo de classificação.

2.4.3 Metodologia PROMETHEE

Os métodos PROMETHEE foram introduzidos por J. P. Brans em 1982 e aprimorados por Brans e B. Mareschal em 1988 e desde estão em contínuo desenvolvimento e adaptações em várias áreas de aplicação.

O objetivo da família PROMETHEE é construir uma relação de sobreclassificação, adicionando como informações as relações entre as alternativas e os critérios, com utilização dessas relações para apoiar a decisão. Os métodos de sobreclassificação utilizam a premissa que, nem sempre, pequenas diferenças entre as avaliações das alternativas são significativas na análise (VINCKE, 1992).

Apesar de ser uma ramificação da família ELECTRE, Gomes (2007) avalia que os métodos PROMETHEE apresentam maior resistência a variação de parâmetros, o que contribui para a solidez da avaliação, contudo, ressalta que assim como o ELECTRE, a família PROMETHEE é vulnerável a subjetividade por parte dos analistas. As diferentes versões do método (PROMETHEE I, II, III, IV e V) visam resolver problemas de ordenação, com aplicação em sistemas com preferências nebulosas (CAMPOS, 2011).

O PROMETHEE realiza a comparação das alternativas entre si, com base em relações binárias que representam o desempenho da alternativa para dado critério.

Dado as alternativas “ a ” e “ b ” $\in A$, onde “ A ” representa o conjunto de alternativas, a função de preferência “ P ” é (BRANS & MARESCHAL, 2005):

$$P: A \times A \rightarrow (0, 1) \quad (18)$$

Assim, é possível calcular o índice de preferência da alternativa “ a ” em relação a alternativa “ b ”, baseado em uma função de preferência “ P_i ” e peso “ w_i ” escolhidos pelo decisor para cada critério c_i ($i=1, \dots, k$).

$$\Pi_{(a,b)} = \sum_{i=1}^k P_i(a,b)w_i \quad (19)$$

Onde $\Pi(a,b)$ representa o grau de preferência de a sobre b para determinado critério, tal que:

- $\Pi(a,b) = 0$: representa indiferença ou não-preferência de “ a ” sobre “ b ”;
- $\Pi(a,b) \sim 0$: representa preferência fraca de “ a ” sobre “ b ”;
- $\Pi(a,b) \sim 1$: representa preferência forte de “ a ” sobre “ b ”;
- $\Pi(a,b) = 1$: representa preferência estrita de “ a ” sobre “ b ”.

A ordenação das alternativas é realizada em função dos índices de preferência positivo $\Phi^+(a)$ e negativo $\Phi^-(a)$, obtidos através das equações 20 e 21.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \Pi(a,b), \quad (20)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in K} \Pi(b,a), \quad (21)$$

Em razão da função de preferência é calculado o grau de preferência da alternativa com maior desempenho. Brans e Mareschal (1986) apresentam seis funções de preferência, contudo vale ressaltar que caso seja necessário, o avaliador pode modelar outra função de preferência auxiliado pelo analista:

i) Função Tipo 1 (*Usual Criterion*)

Nesta função há preferência estrita pela alternativa com melhor desempenho. Assim, para qualquer diferença positiva na avaliação de duas alternativas (a e b), esta

função assume valor “1”. Nos casos em que não há diferença ($a=b$), a função assume valor “0”.

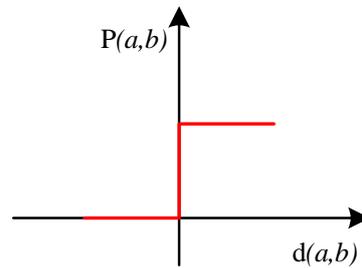


Figura 6 – Função de Preferência Tipo 1
Fonte: Brans e Mareschal (2005)

ii) Função Tipo 2 (*U-Shape Criterion*)

Nesta função a preferência estrita pela alternativa “a” ocorre somente quando a diferença na avaliação das alternativas excede o limiar de indiferença “q”. Nos outros casos ocorre a indiferença.

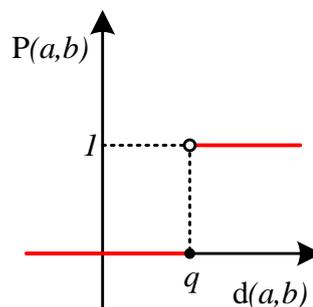


Figura 7 – Função de Preferência Tipo 2
Fonte: Brans e Mareschal (2005)

iii) Função Tipo 3 (*V-Shape Criterion*)

Nesta função “p” é o limiar de preferência estrita. Quando a diferença entre as alternativas é superior a este limiar, há preferência estrita pela alternativa “a”. Quando a diferença é menor que “p” a preferência aumenta de forma linear em razão da diferença entre as alternativas.

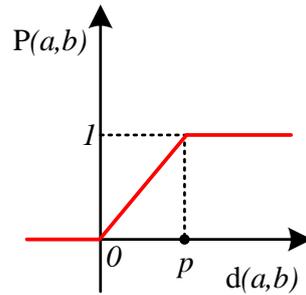


Figura 8 – Função de Preferência Tipo 3
Fonte: Brans e Mareschal (2005)

iv) Função Tipo 4 (*Level Criterion*)

Esta função exige um limiar de indiferença “ q ” e um limiar de preferência “ p ” definidos pelo avaliador. Se $d(a,b)$ é menor que “ q ” há indiferença da alternativa “ a ” em relação a “ b ”. Caso a $d(a,b)$ esteja entre “ q ” e “ p ”, há uma preferência fraca em favor da alternativa “ a ”, e quando a $d(a,b)$ é maior que “ p ” ocorre a preferência estrita em favor de “ a ”.

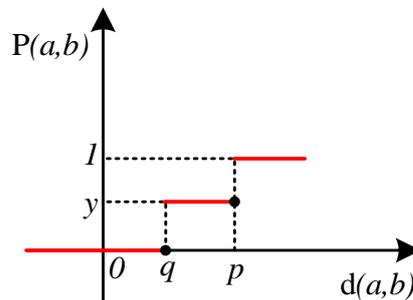


Figura 9 – Função de Preferência Tipo 4
Fonte: Brans e Mareschal (2005)

v) Função Tipo 5 (*V Shape With Indifference*)

Similar a função 4, nesta função a preferência aumenta linearmente da indiferença, limiar “ q ”, para preferência estrita, limiar “ p ”.

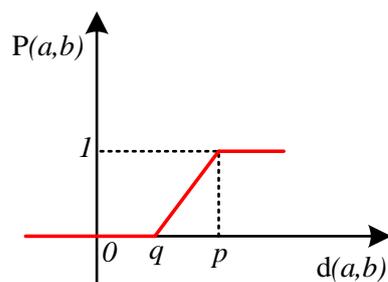


Figura 10 – Função de Preferência Tipo 5
Fonte: Brans e Mareschal (2005)

vi) Função Tipo 6 (*Gaussian Criterion*)

Nesta função é necessário definir o parâmetro “ s ”, cujo valor será responsável pela mudança na concavidade da curva de preferência. Essa função é aplicada em critérios quando há a necessidade de incrementar (ou reduzir) a preferência em razão de uma afastamento do parâmetro “ s ”. Assim, a preferência aumenta ou diminui de forma assintótica conforme a $d(a,b)$ é superior ou inferior a “ s ” (GONÇALVES, 2001).

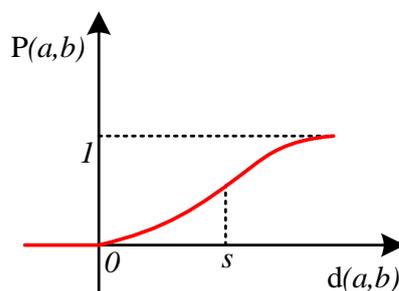


Figura 11 – Função de Preferência Tipo 6
Fonte: Brans e Mareschal (2005)

2.4.4 PROMETHEE I

Fornece um pré-ranking parcial entre as alternativas de um problema, o qual é obtido através de fluxo positivo, que indica o quanto uma alternativa domina a outra, e um fluxo negativo, que indica o quanto a alternativa é dominada. Brans e Mareschal (2005) que os fluxos apresentam resultados distintos, sendo o PROMETHEE I a sua intersecção. A pré-ordem do método é obtida por:

$$\begin{cases} aP^+ b \text{ se e somente se } \phi^+(a) > \phi^+(b), \\ aI^+ b \text{ se e somente se } \phi^+(a) = \phi^+(b). \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} aP^-b \text{ se e somente se } \emptyset^-(a) > \emptyset^-(b), \\ aI^-b \text{ se e somente se } \emptyset^-(a) = \emptyset^-(b). \end{cases} \quad (23)$$

A pré-ordem parcial (P_1 , I_1 e R) é obtida através da interseção das pré-ordens:

$$\begin{cases} aP_1b \text{ (a sobreclassifica b) se } \begin{cases} aP^+b \text{ e } aP^-b, \\ aP^+b \text{ e } aI^-b, \\ aI^+b \text{ e } aP^-b, \end{cases} \\ aI_1b \text{ (a sobreclassifica b) somente se } I^+b \text{ e } aI^-b, \\ aRb \text{ (a é incompatível com b) para outras situações.} \end{cases} \quad (24)$$

2.4.5 PROMETHEE II

Aplicado em problemas de ordenação, fornece uma pré-ordem completa das alternativas. O fluxo líquido é obtido por:

$$\emptyset(a) = \emptyset^+(a) - \emptyset^-(a) \quad (25)$$

Quanto maior o fluxo líquido melhor a alternativa, de modo que:

$$\begin{cases} aP_{II}b \text{ (a sobreclassifica b) se e somente se } \emptyset(a) > \emptyset(b), \\ aI_{II}b \text{ (a é indiferente a b) se e somente se } \emptyset(a) = \emptyset(b). \end{cases} \quad (26)$$

As seguintes propriedades são válidas para o método:

$$\begin{cases} -1 \leq \emptyset(a) \leq 1, \\ \sum_{x \in A} \emptyset(a) = 0. \end{cases} \quad (27)$$

Assim, se $\emptyset(a) > 0$, a alternativa supera as demais em todos os critérios, e se $\emptyset(a) < 0$, a alternativa é superada por todas do conjunto. A ordenação resultante da aplicação do PROMETHEE pode ser visualizada através do gráfico dos perfis de todas as alternativas em razão do fluxo líquido, conforme figura 12.

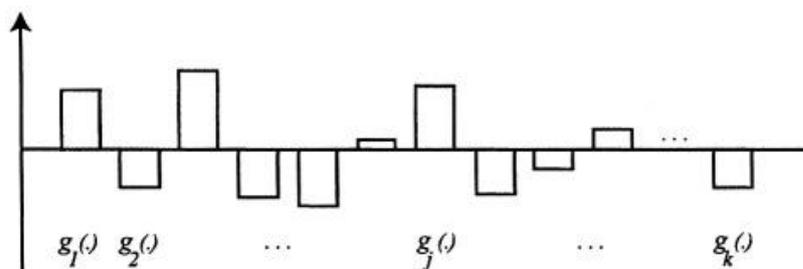


Figura 12 – Perfil de superação de cada alternativa
Fonte: Brans e Mareschal (2005)

Outras versões do método compõem a família PROMETHEE (BRANS & MARESCHAL, 2005; CAMPOS, 2011):

PROMETHEE III: Realiza a ordenação das alternativas potenciais através do tratamento probabilístico de fluxos (intervalos de preferência);

PROMETHEE IV: Apresenta uma pré-ordem completa ou parcial, sendo uma continuação do PROMETHEE II comportando um número infinito de alternativas;

PROMETHEE V: Outra extensão do PROMETHEE II, aplicado quando o decisor não é capaz de estabelecer valores fixos no peso dos critérios;

PROMETHEE GAIA: Apresenta o resultado do PROMETHEE através de um procedimento visual e de forma interativa, com a finalidade de observar a influência dos pesos de cada critério nas alternativas.

2.5 MODELOS MULTICRITÉRIOS APLICADOS EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Neste tópico são apresentadas aplicações com a utilização de metodologias multicritério na área de manutenção industrial, com objetivo de investigar quais pesquisas possuem uma natureza similar ao tema do projeto e observar os seguintes aspectos: o problema em questão, os critérios propostos e a metodologia empregada para resolução. Ao final do tópico são apresentadas as principais pesquisas relacionadas com análise de criticidade em equipamentos industriais.

O quadro 2 apresenta as principais aplicações pesquisadas na área de manutenção, os métodos multicritério associados e os critérios de decisão.

Quadro 2 – Aplicações multicritério em manutenção industrial

Autores	Problema	Método Multicritério	Crítérios
Almeida (2000)	Seleção de contratos de reparo e fornecimento de sobressalentes no planejamento de manutenção;	MAUT	Riscos; Custos;
Nordgard, Heggset e Ostgulen (2003)	Priorização de projetos de manutenção em empresas de energia;	AHP	Segurança; Ambiente de trabalho; Meio-ambiente; Custos; Avaliação da empresa;
Najjar e Alsyouf (2003);	Seleção da abordagem de manutenção mais eficiente;	Fuzzy e MCDM	Fatores operacionais e condições ambientais; Qualidade das atividades de manutenção e inspeção; Tempo de operação;
Almeida (2005); Cavalcante e Almeida (2004)	Seleção de Intervalos para manutenção preventiva;	MAUT PROMETHEE II	Custo; Confiabilidade;
Carnero (2005)	Seleção de técnicas de diagnóstico e medição em um programa de manutenção preventiva;	AHP	Qualidade de diagnóstico; Quantidade de falhas detectadas; Custo; Suporte técnico;
Moreira, Dupont e Vellasco (2006)	Identificação e classificação dos modos de falha em subestações elétricas;	PROMETHEE Fuzzy PROMETHEE	Ocorrência; Detecção da causa; Impactos econômicos; Impactos operacionais; Impactos ambientais; Segurança; Risco;

Fonte: Autor (2015)

Quadro 2 – Aplicações multicritério em manutenção industrial (continuação)

Autores	Problema	Método Multicritério	Critérios
Bertolini e Bevilacqua (2006)	Definir a estratégia de manutenção de bombas centrífugas críticas em uma refinaria;	AHP	FMECA;
Almeida (2007)	Seleção de contratos de terceirização em manutenção;	ELECTRE	Custo do contrato; Confiabilidade do contrato;
Wang, Chu e Wu (2007)	Seleção da estratégia de manutenção ideal;	AHP/Fuzzy	Segurança Pessoal; Ambiente; Custos de hardware, software e treinamento; Valor agregado (estoque, perdas de produção e identificação da falha); Viabilidade Técnica;
Li, Xu e Guo (2007)	Seleção da estratégia de manutenção para cada equipamento considerando avaliações difusas e determinísticas;	ELECTRE III	Segurança; Meio-ambiente; Custo; Valor agregado; Aplicabilidade;
Alárcon, Grau e Torres (2007)	Aperfeiçoar ações de reparo na manutenção de redes de telecomunicações;	ELECTRE I	Custo de materiais; Hora-técnicas; Multas; Impacto sobre o cliente; Impacto na imagem da operadora;
Sachdeva, Kumar e Kumar (2009)	Priorização de modos de falha de um Digestor em uma Fábrica de Papel;	TOPSIS	Probabilidade da falha; Detecção da falha; Mantenabilidade; <i>Spare Parts</i> ; Segurança; Custos;
Arunraj e Maiti (2010)	Seleção da política de manutenção baseada no risco;	AHP	Riscos; Custos;

Fonte: Autor (2015)

Quadro 2 – Aplicações multicritério em manutenção industrial (continuação)

Autores	Problema	Método Multicritério	Critérios
Tan et al (2011)	Seleção da estratégia de manutenção de uma refinaria baseado no seu nível de risco;	AHP	Segurança (pessoal, ambiente, instalação); Custos (operação e manutenção); Valor de produção agregado; Viabilidade de implantação;
Momeni <i>et al.</i> (2011)	Seleção das estratégias de manutenção em uma companhia elétrica;	Fuzzy TOPSIS	Impacto na qualidade do produto; Perdas de produção; Itens em estoque; Aplicabilidade da técnica; Acesso ao equipamento e tecnologia; Confiabilidade da técnica; Segurança; Instalações; Equipe técnica; Meio-ambiente; Custo; Hardware; Necessidade de especialista; Software;
ZAIM <i>et al.</i> (2012)	Seleção das estratégias de manutenção em organização com necessidades críticas de produção;	AHP ANP	Custo; Manutenção; Confiabilidade; Disponibilidade.
Certa, Enea e Lupo (2013)	Seleção dos componentes a serem substituídos em parada programada de manutenção;	ELECTRE TRI	Confiabilidade; Custo; Tempo de operação;
Ishikaza e Nemery (2014)	Definir equipamentos e máquinas adequados para cada estratégia de manutenção;	ELECTRE SORT	Tempo de quebra; Frequência da falha; Custo do equipamento; Impacto na produção;

Fonte: Autor (2015)

Almeida e Cavalcante (2004) apresentam um modelo de decisão que utiliza o PROMETHEE II e Análise Bayesiana para estabelecer a periodicidade de ações preventivas baseado no parâmetro de confiabilidade e custo unitário. No modelo os autores utilizam a abordagem bayesiana para trabalhar com as incertezas dos tempos de falha dos componentes, os quais são definidos por um especialista, e a metodologia PROMETHEE II na ordenação das alternativas, destacando a avaliação comparativa do método.

O trabalho de Moreira, Dupont e Vellasco (2006) propõem uma metodologia multicritério para identificar e classificar os modos de falha de uma subestação elétrica, em face aos métodos empíricos empregados tradicionalmente. O emprego da método Fuzzy-PROMETHEE resulta em uma ordenação mais realista devido, em razão da falta de dados do trabalho e o PROMETHEE II realiza a ordenação final dos modos de falha.

Almeida (2007) utiliza o ELECTRE na seleção de contratos de terceirização em manutenção, em que destaca a utilização do método em situações de incerteza nas quais o decisor opta por critérios não compensatórios e o problema não requer a agregação de todos os critérios. No trabalho os critérios avaliados são representados por uma função de utilidade, a qual incorpora a estrutura probabilística do problema.

Li, Xu e Guo (2007) propõem a aplicação do ELECTRE III baseada em uma ordenação de números difusos na seleção da estratégia de manutenção. Os autores observam que a seleção de uma estratégia de manutenção é realizada em razão de uma análise determinista e uma difusa. Assim, eles utilizam um método de classificação para transformar as avaliações difusas de cada critério em números reais, para então aplicar o ELECTRE III na seleção da estratégia mais adequada.

Alárcon, Grau e Torres (2007) utilizam o ELECTRE I na priorização da ordem de reparos em redes de telecomunicações. Contudo no modelo desenvolvido, é necessária uma filtragem das alternativas, antes de sua priorização pelo método.

Certa, Enea e Lupo (2013) utilizam o ELECTRE III na seleção dos componentes em manutenções preventivas. No trabalho os autores utilizam a Otimização Multi-objetivos para encontrar as configurações ótimas (componentes a serem substituídos) baseados na indisponibilidade do sistema, selecionando a melhor configuração através do ELECTRE.

Nos estudos mencionados, apesar de aplicações distintas, fica clara a importância de alguns fatores essenciais em decisões na área de manutenção, tais

como segurança, meio-ambiente, impacto na produção (operacional, qualidade, econômico), além de fatores inerentes a manutenção, como MTBF, confiabilidade, taxa de falhas, entre outros. Contudo, algumas aplicações contemplam critérios específicos do contexto e da problemática no qual estão inseridos, os quais podem apresentar um peso superior aos outros critérios, devido seu impacto no processo.

Outro ponto observado é que muitas das aplicações possuem critérios que englobam aspectos qualitativos e quantitativos, o que comprova a necessidade de um método de avaliação eficiente, capaz de avaliar de forma objetiva e subjetiva o problema, justificando a utilização da ferramenta multicritério.

2.5.1 Modelos Multicritérios aplicados na priorização de Sistemas Críticos

A seguir serão apresentados os principais estudos da utilização de métodos multicritérios em análise de criticidade e priorização de equipamentos. Esta revisão tem o objetivo de fornecer a base conceitual para desenvolvimento do modelo multicritério para análise de criticidade em sistemas industriais, através da observação das ferramentas empregadas em cada aplicação, critérios utilizados, sistema de preferências, entre outros.

Moreira (2009) apresenta um modelo multicritério (figura 12) para a priorização de modos de falha através de sua criticidade, utilizado dentro da metodologia MCC. No modelo a autora aplica um sistema de inferência *fuzzy* para integrar os aspectos relativos à severidade, com a utilização dos métodos PROMETHEE e *Fuzzy-PROMETHEE* para priorização das alternativas. Mesmo tratando-se de uma classificação dos modos de falha, e não do equipamento em si, é importante destacar a escolha dos critérios utilizados no modelo: grau de ocorrência, confirmação da causa (detectibilidade); severidade nos impactos econômicos, operacionais, de segurança e ambientais e grau de risco.

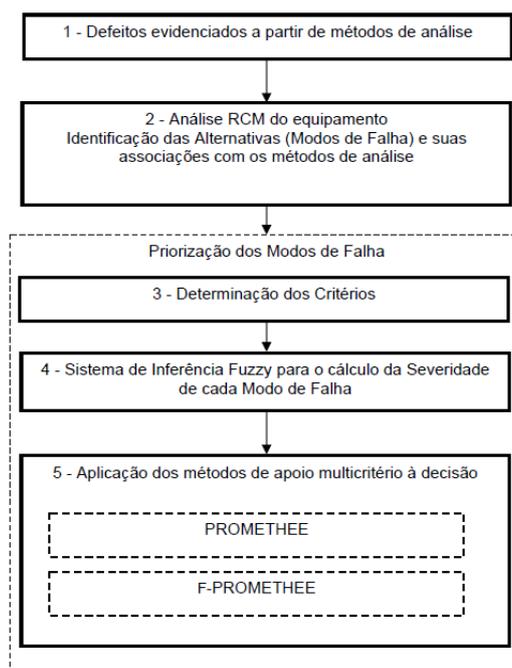


Figura 13 – Modelo multicritério para priorização de modos de falha
Fonte: Moreira (2009)

Helmann (2008) apresenta uma proposta de avaliação de criticidade de equipamentos com utilização do ELECTRE I, na seleção dos equipamentos com maior criticidade e o PROMETHEE II na sua ordenação. O modelo proposto apresenta como critérios fatores de segurança, produção, qualidade, segurança alimentar, custos de manutenção, frequência das falhas e número de intervenções. Na sua aplicação, o autor avalia 39 equipamentos, selecionando os mais críticos com o ELECTRE I, contudo na ordenação das alternativas são avaliados apenas 04 equipamentos aleatoriamente.

Na avaliação de criticidade proposta por Hijes e Cartagena (2006) tem-se utilização de um índice de criticidade, apresentado na equação 28, para determinar os equipamentos críticos:

$$Ic = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (d_i \times w_i)}{d \times \sum_{i=1}^n w_i} \quad (28)$$

onde:

n é o número de critérios;

d é graus de criticidade definido na escala do critério;

d_i é o grau de criticidade do equipamento de acordo com o critério c_i ;

w_i é o peso do critério c_i ;

Diferente de outros modelos, onde cada critério possui um peso individual relativo ao processo, os autores ordenam os critérios por categorias, as quais são avaliadas entre si. Os pesos das categorias são definidos em razão da importância dos critérios alocados em cada uma e através de um sistema de comparação, com utilização de um vetor critério. Outro diferencial do trabalho é criação de uma escala única de avaliação para todos os critérios.

Braglia (2000) propõem uma abordagem multicritério na análise de modos de falha, combinando a metodologia FMECA (Análise Crítica dos Modos de Falha e Efeitos), com o método AHP. A abordagem proposta, denominada “Análise Multi-atributo dos Modos de Falha” (MAFMA), do inglês *Multi-attribute Failure Mode Analysis*, utiliza os critérios tradicionais do FMECA (criticidade, probabilidade da falha e detecção), aliados ao custo da falha. No modelo proposto o AHP realiza a seleção das causas críticas. O enfoque do trabalho está na possibilidade da utilização de pesos para os critérios escolhidos, algo não utilizado no FMECA, além da inclusão de novos critérios. Através de uma aplicação prática, o autor compara as duas abordagens apresentando diferenças consideráveis devido à utilização da técnica multicritério.

Zammori e Gabrielli (2011) reforçam a utilização de modelos multicritérios aplicados no cálculo do número de risco (RPN) com aplicação do Processo Analítico de Rede, do inglês *Analytic Network Process* (ANP). Os autores dividem os critérios severidade, ocorrência e detecção em subcritérios e observam as interações entre eles e as alternativas na obtenção do RPN. Diferente do AHP, que possui uma estrutura hierárquica, o ANP possibilita a interação e interdependências entre as classes de critérios, subcritérios e alternativas, o que permite a avaliação conjunta dos parâmetros e suas dependências, diferente da abordagem absoluta presente na AHP e RPN tradicional. A figura 13 apresenta o modelo RPN/ANP.

Como o método ANP, Chen e Lee (2007) sugerem uma otimização do FMEA, onde o peso dos critérios (severidade, detecção e probabilidade de falha) são determinados em razão das interdependências presentes na análise (relação do efeito sobre o modo de falha, da causa sobre o efeito, do método de controle sobre a causa).

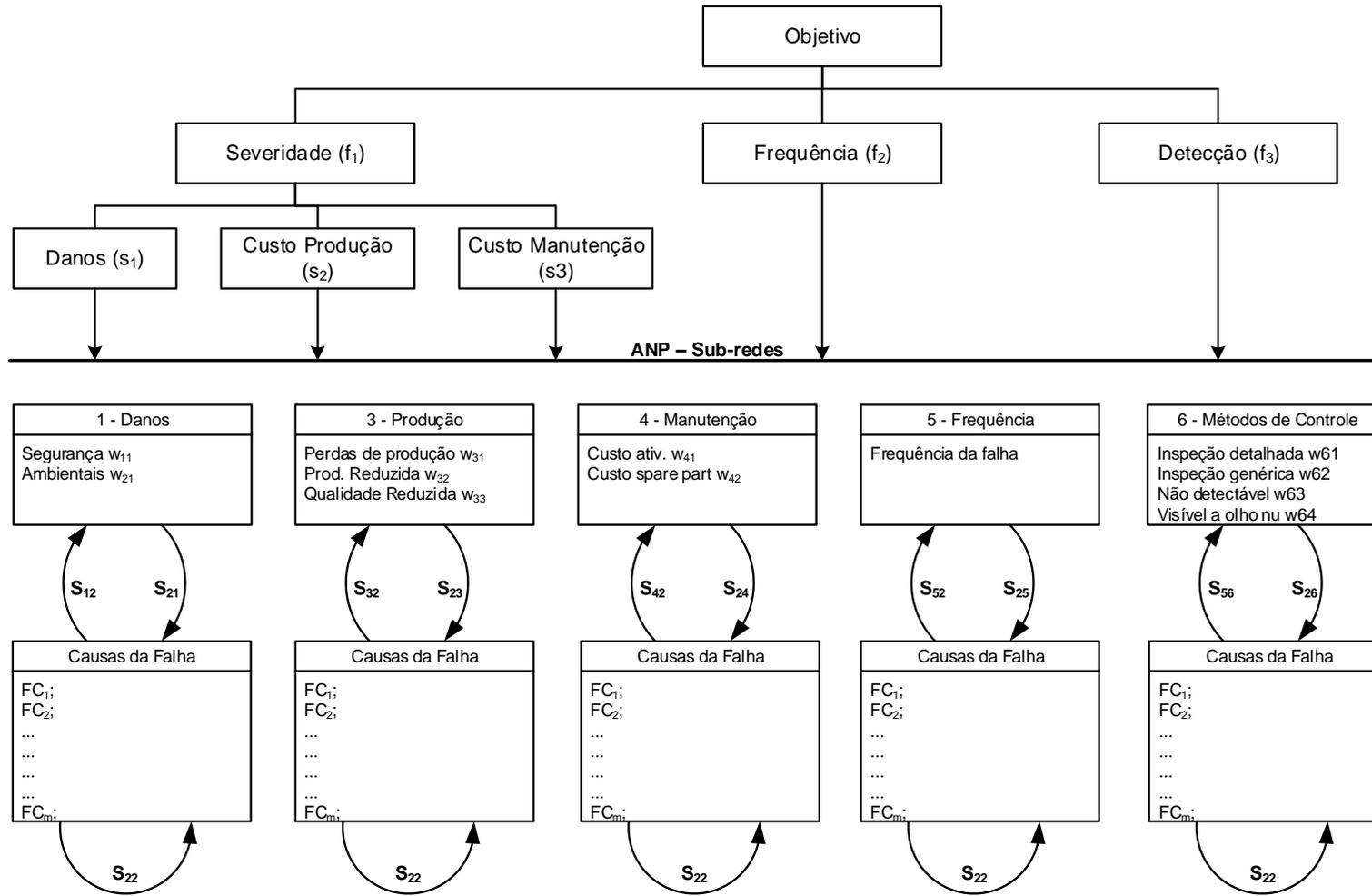


Figura 14 – Modelo de avaliação multicritério do RPN
Fonte: Zammori e Gabrielli (2011)

Ayadi *et al.* (2013) apresentam uma abordagem multicritério, onde empregam a ferramenta PROMETHEE na priorização dos critérios (severidade e frequência) utilizados em análise FMEA. Cientes da dificuldade de definir as preferências do decisor sobre cada critério, e a relação distinta deste com cada modo de falha, os autores definem a importância de cada um dos critérios para os diferentes modos de falha, com objetivo identificar os critérios que otimizem o fator segurança humana.

Lins, Garcez e Alemida (2011) definem a criticidade dos modos de falha através de uma extensão do PROMETHEE, o PROMSORT, o qual designa as alternativas (modos de falha) em categorias predefinidas com base no perfil limite dessas categorias.

Siqueira *et al.* (2009) descrevem uma aplicação genérica do método ELECTRE TRI na priorização dos equipamentos sob os seguintes critérios: consequência para segurança e meio-ambiente, consequência econômica, frequência de falhas, *delay time* e grau de dificuldade de detecção da falha. Apesar da utilização de alguns critérios quantitativos, os autores optaram pela utilização de uma escala comum a todos os critérios.

Buscando diminuir a imprecisão tanto na avaliação dos critérios qualitativos, quanto na identificação de pesos, Dehghanian *et al.* (2012) sugerem a utilização do método Fuzzy AHP, onde a incerteza e imprecisão de uma avaliação subjetiva por parte dos analistas e decisores diminui com a utilização de técnicas *fuzzy* aplicadas na avaliação dos critérios.

Apesar da variedade dos modelos apresentados na literatura, poucos abordam a problemática de classificação e ordenação de equipamentos críticos, ou quando o fazem, utilizam em um contexto de aplicação específico, como Trojan & Morais (2012), Hijes e Cartagena (2006), ou como complemento a uma ferramenta específica de análise de falhas, como Zammori & Gabbrielli (2011). Contudo nenhum trabalho apresenta um modelo genérico de análise de criticidade, que possa ser adaptado a qualquer segmento industrial ou utilizado em conjunto com alguma metodologia de manutenção, que consiste a proposta deste trabalho.

3 PROPOSIÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO PARA ANÁLISE DE CRITICIDADE

Este capítulo apresenta e descreve o modelo multicritério proposto para análise de criticidade. O diagrama, apresentado na figura 14, estrutura o processo de decisão, e apresenta os componentes e etapas no processo de análise (contexto, alternativas, critérios, problemática, decisores).

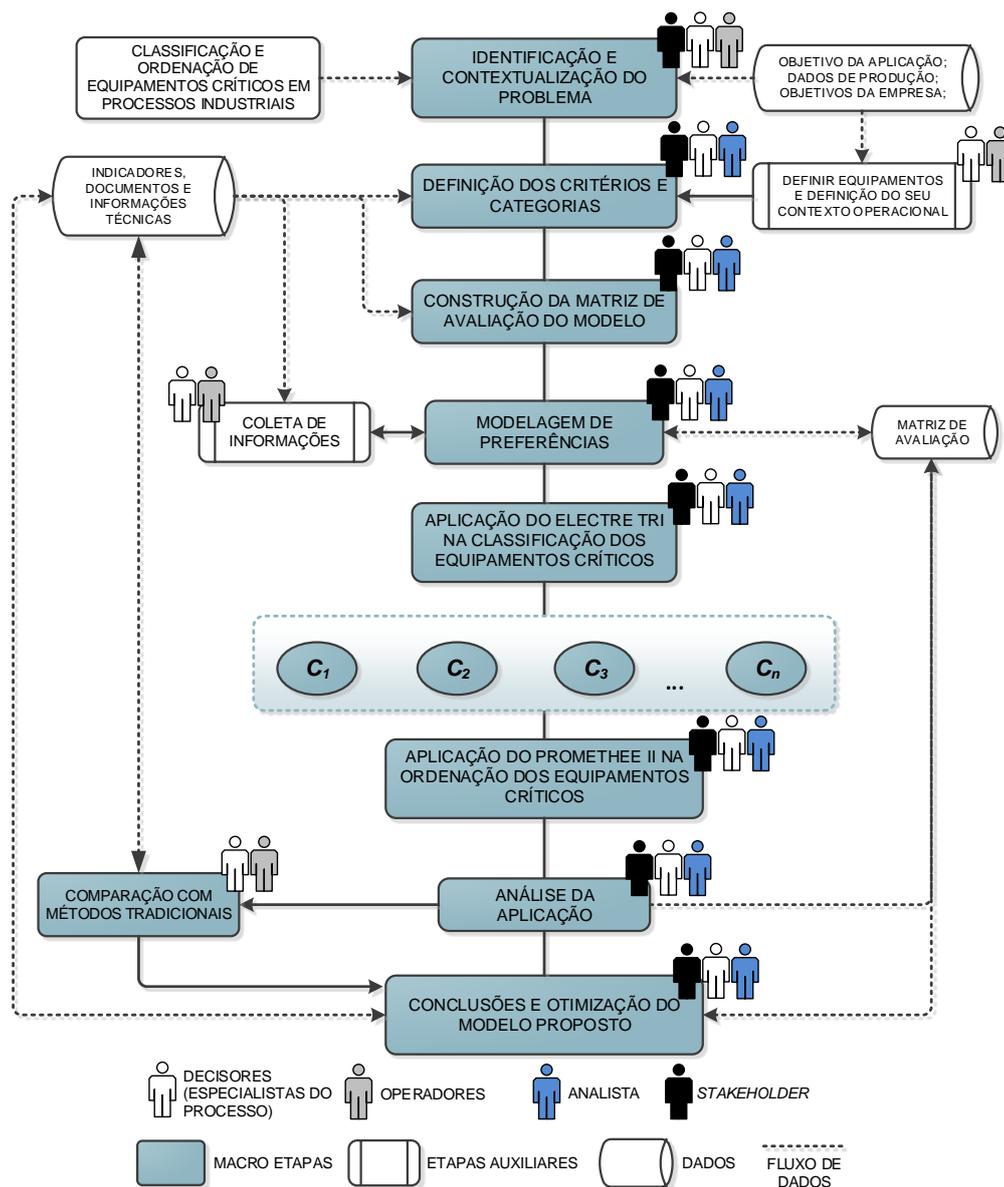


Figura 15 – Modelo multicritério de análise de criticidade
Fonte: Autor (2015)

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

A metodologia definida para esse trabalho é a de classificar e ordenar os equipamentos conforme a criticidade. Antes da aplicação da metodologia torna-se necessária uma etapa para contextualizar e estruturar o problema. Determinar a criticidade de um equipamento requer uma visão sistêmica do processo no qual ele está inserido, as condições operacionais, objetivos e contextos específicos de aplicação, que variam conforme cada segmento industrial.

O objetivo desta etapa também será de definir quem são os atores e decisores que estarão envolvidos com o processo de análise, assim como as ações e a problemática em questão. No modelo são propostos 04 atores distintos no processo de análise:

- Decisores (Especialistas): São os atores envolvidos no processo de análise e responsáveis pela decisão. Devem possuir um conhecimento técnico e operacional do sistema ou equipamento a ser analisado, pois serão responsáveis pela avaliação dos componentes mediante os critérios. Nesta classe podem ser incluídos gestores e supervisores do processo, técnicos de manutenção e operadores de produção;
- Operadores: Este grupo é formado de pessoas que estão envolvidas de forma direta com o sistema em análise, contudo não possuem poder de decisão. São responsáveis por realizar a coleta de informações sobre o sistema e contribuir com os decisores durante o processo de análise. Este grupo pode ser formado por técnicos de segurança, técnicos ambientais, planejadores de produção;
- *Stakeholders*: Grupo formado por qualquer pessoa ou organização que tenham interesse no processo de análise, que podem afetar ou ser afetados pelo resultado do modelo. A função desse grupo é contribuir e estar envolvidos com a aplicação do modelo e auxiliar no processo de decisão. Podem ser incluídos neste grupo: diretores, acionistas, gestores, representantes externos, clientes, entre outros; e
- Analista: Responsável por conduzir o processo de aplicação do modelo, analisar e auxiliar os decisores na modelagem do problema e suas preferências e identificar fatores que possam interferir na análise.

Como o foco desse modelo é voltado para a análise de criticidade, é importante definir nesse contexto sobre os equipamentos que estarão em operação ou sobre mesmo em etapa de projeto, assim como a sua importância para o processo produtivo e para a determinação futura de políticas de manutenção.

Durante a contextualização do problema os objetivos que levam a realizar a análise de criticidade devem estar claros aos decisores, de forma a proporcionar o atingimento de todos os resultados esperados, e respeitadas as especificidades e restrições de cada aplicação.

3.2 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E CATEGORIAS

Após estruturar e contextualizar o problema, a próxima fase convergirá para a determinação dos critérios e pesos relativos, identificação das categorias nas quais os equipamentos serão classificados e para a quantificação do desempenho dos equipamentos relacionados a cada critério elencado. Os critérios esperados para esse contexto estão diretamente relacionados com indicadores de manutenção, níveis de segurança, níveis de disponibilidade e custos.

3.2.1 Definição das alternativas

A disponibilidade e a eficiência em um sistema produtivo estão diretamente ligadas ao nível de manutenção em seus componentes. Para que isso seja efetivado, diversas técnicas podem ser utilizadas tais como, periodicidade de intervenções, qualidade da manutenção e principalmente a determinação dos equipamentos e componentes que impactam de maneira significativa no funcionamento das funções básicas do sistema.

Definir a criticidade de um equipamento ou sistema industrial é uma atividade complexa, onde apenas um componente, situado numa posição de fragilidade para o sistema, pode desencadear uma falha e afetar o sistema como um todo. Assim a criticidade de um processo produtivo define a importância de todos os componentes que compõem este processo, em vários níveis hierárquicos.

Abordar o sistema ao nível do componente restringiria o modelo e o processo de decisão sobre o sistema, ou em outro extremo, abordar toda a planta em uma só

vez, demandaria muito tempo e aumentaria a complexidade do processo de decisão em razão do número de componentes/equipamentos analisados.

Estabelecido o sistema que será estudado e o nível de profundidade que a análise pretende chegar, todos os componentes que o compõem esse conjunto de definições devem ser incluídos na matriz de avaliação. Cabe ressaltar que mesmo componentes simples do ponto de vista técnico podem apresentar criticidade elevada, quando avaliados sob uma visão de conjunto do sistema.

Para evitar erros na identificação dos componentes, é vital a consulta às informações técnicas do equipamento. Uma importante fonte de informação é a estrutura hierárquica do processo, também chamada de árvore de máquinas, apresentada na figura 15. Outras fontes possíveis de consulta são: dados de projeto, planos de manutenção, manuais de operação, esquemas técnicos, entre outros.

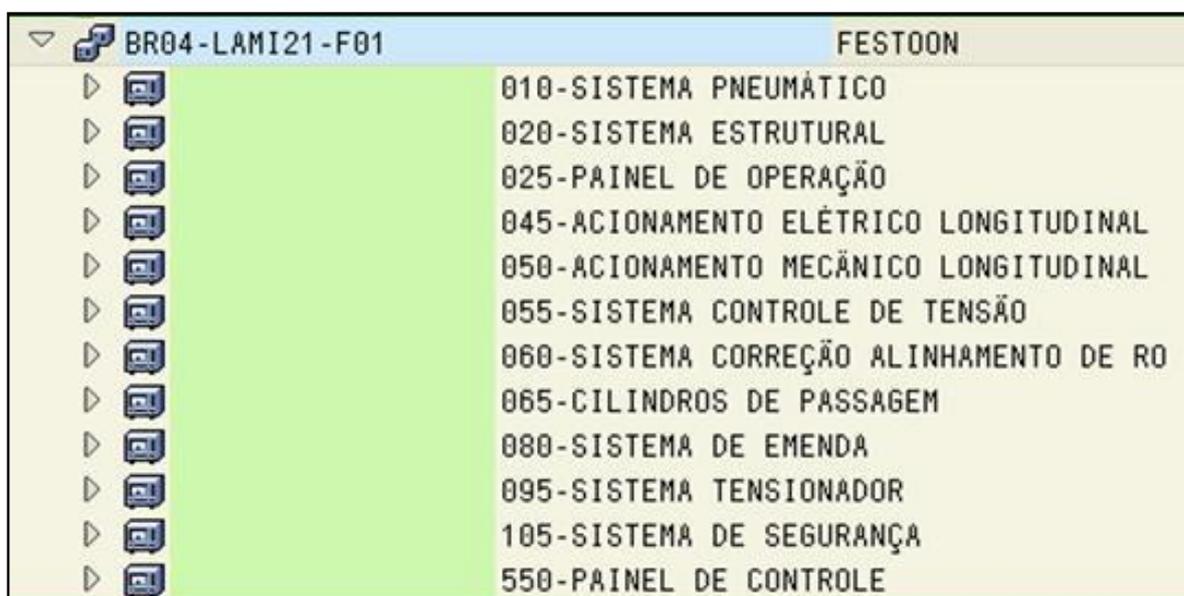


Figura 16 – Exemplo de uma árvore de máquina de um equipamento

Fonte: Autor (2015)

O quadro 03 apresenta um exemplo de equipamentos identificados como alternativas em uma avaliação de criticidade.

Quadro 3 – Seleção de alternativas para aplicação do modelo (exemplo)

		Componentes	Alternativa
Máquina Festoon	Acionamento elétrico longitudinal	Motor AC	a₁
		Encoder incremental	a₂
		Drive motor	a₃
		Cabos de alimentação	a₄
		Ventilador	a₅
		Conversor AC/DC	a₆
		Chave Seccionadora	a₇
		Fusíveis	a₈
		Sensores Indutivos e Fim de curso	a₉
	Acionamento mecânico longitudinal	Fusos/Buchas	a₁₀
		Rolamentos	a₁₁
		Correia Sincronizadas	a₁₂
		Polias	a₁₃
		Controle de tensão	a₁₄
	Atuadores Pneumáticos	Articulações	a₁₅
		Sensor indutivo analógico e atuador	a₁₆
		Reservatório de Ar	a₁₇
		Válvula Proporcional	a₁₈
		Conversor E/P	a₁₉
		Pressostato	a₂₀
		Mangueira/conexões	a₂₁
		Placa analógica do S7 I/O	a₂₂

Fonte: Autor (2015)

3.2.2 Definição dos Critérios

Os critérios selecionados são responsáveis por comparar e avaliar as alternativas (equipamentos) durante o processo de análise, portanto é fundamental que essa definição reflita, além do objetivo da análise, uma estreita relação com o conjunto de alternativas, desconsiderando os critérios não significativos. Outro ponto importante é que os critérios selecionados sejam inteligíveis por todos os envolvidos no processo de análise, que permitirá uma avaliação mais coerente e dentro da perspectiva desejada.

O tópico da revisão de literatura apresentou alguns critérios comumente utilizados na avaliação de criticidade de processos e equipamentos, muitos dos quais empregados em ferramentas tradicionais da manutenção. Além dos critérios propostos, devem ser considerados critérios específicos da natureza da aplicação, ou

do processo, em que o sistema opera, como indicadores do setor, limites a normas ambientais e de segurança, operação em área classificada, entre outros. O quadro 04 apresenta um levantamento oriundo da pesquisa bibliográfica realizada e apresentada no item 2.5, sobre os critérios comumente aplicados na análise de criticidade.

Quadro 4 – Critérios aplicados em problemáticas de manutenção

Parâmetros	Critérios	Autores
Fatores de Segurança e meio-ambiente	Segurança pessoal e da instalação; Risco ao meio-ambiente; Infração de normas e leis ambientais;	JIPM (1995); Moubray (1997); Moss & Woodhouse (1999); Hijes & Cartagena (2006); Ping et. al (2007);
Fatores de Produção	Impacto na qualidade do produto; Impacto na linha de produção; Impacto econômico na produção; Sobressalentes; Regime de operação do sistema; Impacto em outros sistemas;	JIPM (1995); Moubray (1997); Hijes & Cartagena (2006); Ping et. al (2007);
Fatores de Manutenção	Tempo médio entre falhas (MTBF); Tempo médio de reparo (MDT); Taxa de falha; Detecção da falha; Disponibilidade / Confiabilidade;	Horenbeek & Pintelon (2010); Ping et. al (2007); Moss & Woodhouse (1999); IEC (2006);
Fatores Econômicos	Custo de manutenção; Custo de produção; Custo da quebra; Custo do equipamento; Manutenabilidade	Horenbeek & Pintelon (2010); Ping et. al (2007); Hijes & Cartagena (2006);

Fonte: Autor (2015)

Juntamente com os critérios, são necessárias definições sobre as escalas pelas quais eles serão avaliados. Todas essas escalas deverão ser claras e representar cada magnitude de forma precisa, a fim de permitir uma avaliação sem desvios ou interpretações equivocadas. No caso de escalas quantitativas, presentes em critérios como taxa de falhas, MTBF, confiabilidade, os limites e unidades de medida da escala são padronizados. Critérios com avaliação ordinal, como impactos na produção, impacto na qualidade, devem ter seus limites discutidos pelos analistas, *stakeholders* para evitar erros de julgamento durante sua avaliação.

3.2.3 Peso dos critérios

Os pesos atribuídos aos critérios precisam refletir a importância relativa de cada critério dentro do contexto estudado e a importância do critério relacionado ao processo em que o objeto de análise está inserido. Com isso, indicadores e metas de produção podem também ser utilizados como balizadores para mensurar o peso dos critérios. Outro ponto importante a ser observado é a busca do consenso entre os decisores da área de manutenção sobre o foco a ser dado em critérios relativos aos assuntos correlacionados à atividade tais como: segurança e meio-ambiente.

Nesta etapa, independente da técnica utilizada na quantificação dos pesos, é necessário buscar consenso entre os envolvidos no processo de análise. Este consenso pode ser obtido através de rodadas de avaliação com a equipe de análise ou através de uma aplicação coletiva da ferramenta escolhida para mensurar o peso dos critérios.

3.2.4 Definição das categorias

As alternativas classificadas deverão ser alocadas em categorias, que são definidas nesta etapa. Esta definição deverá estar consoante com o objetivo da análise, das alternativas (equipamentos ou sistemas), critérios definidos e as ações previstas após a análise. Por exemplo, uma análise de criticidade na metodologia MCC requer ao menos 06 categorias, baseado no tipo de manutenção a ser aplicada (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009), já para aplicação das fases iniciais do TPM é aconselhado classificar os equipamentos em três níveis de criticidade, conforme as políticas de manutenção que serão adotadas para cada nível.

3.3 DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ DE AVALIAÇÃO

Nesta etapa deve-se iniciar a elaboração da matriz de avaliação das alternativas mediante os critérios propostos. As alternativas, critérios e categorias identificados nas etapas anteriores, bem como todas as informações técnicas coletadas deverão estar disponíveis durante a construção da matriz.

3.3.1 Modelagem de Preferências

Nesta etapa, o analista deve auxiliar o decisor a expor informações sobre as suas preferências com objetivo de criar os limiares que serão utilizados nas aplicações dos métodos multicritérios, devendo definir:

Limiares discriminatórios: limiar de indiferença (q_j), compatível com a indiferença entre duas alternativas, e limiar de preferência (p_j) para justificar a preferência em favor de uma das alternativas;

Limiar de veto (v_j): estabelece o poder de um dado critério que invalida a afirmação “a supera b”, quando a diferença entre $g(b)$ e $g(a)$ é maior que este valor;

Limites inferiores e superiores de cada categoria;

Índice de credibilidade (σ): representa o grau de credibilidade da informação aSb ;

Nível de credibilidade (λ): valor mínimo para o índice de credibilidade.

3.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIOS

Definidos todos os elementos necessários para realização da análise, o passo seguinte consiste em aplicar os métodos multicritérios selecionados para o modelo proposto. O primeiro passo é a aplicação do método ELECTRE TRI para classificação das alternativas (equipamentos) nas categorias definidas pelo decisor conforme sua criticidade.

Através da aplicação do ELECTRE TRI o decisor irá visualizar as alternativas em categorias distintas conforme sua criticidade, com uma visão macro do processo em que análise é realizada. Os resultados dessa classificação irão contribuir para gestão das políticas de manutenção adequadas a cada categoria. Por exemplo, uma alta concentração de equipamentos em uma categoria mais crítica indica que as ações da manutenção devem ser imediatas para a mesma, por outro lado, uma concentração alta de equipamentos em categorias de menor criticidade permite uma ação mais sistêmica e planejada da manutenção.

Entretanto, o ELECTRE TRI apenas classifica os equipamentos em categorias segundo sua criticidade, porém dentro de uma mesma categoria não é possível afirmar que os equipamentos são ordenados conforme sua criticidade. Sendo assim,

após a classificação dos equipamentos, o modelo propõem a utilização de uma ferramenta para ordená-los em razão da sua criticidade, e informar quais equipamentos mais críticos em cada categoria. Para essa etapa de ordenação o método utilizado foi o PROMETHEE II, que estabelece uma pré-ordem completa entre as alternativas, utilizado em problemáticas de ordenação.

A ordenação das alternativas justifica-se pela necessidade de uma avaliação individual de cada equipamento e permitir uma ordenação completa baseada na comparação entre as alternativas analisadas. Outro ponto importante na utilização do método PROMETHEE II é a utilização das funções de preferências para modelar as preferências do decisor para cada critério. Por fim a ordenação dos equipamentos permitirá a manutenção selecionar, dentro de uma determinada categoria os equipamentos mais críticos, contribuindo com o planejamento das ações e recursos a serem utilizados.

Concluída a aplicação dos métodos multicritérios, o modelo propõe uma análise prévia dos resultados com os decisores e gestores do processo. Esta análise poderá ser realizada através da comparação dos resultados obtidos do modelo com ferramentas tradicionais empregadas na análise de criticidade, como classificação ABC, *Risk Priority Number*, FMECA e avaliação dos decisores.

Além de ser fundamental no objetivo do trabalho, classificar e ordenar equipamentos críticos, as etapas de comparação e conclusão irám validar o modelo proposto, além de contribuir com a otimização do mesmo para futuras aplicações. Por isso é importante que todas as informações e conclusões da aplicação realimentem o banco de dados utilizado na aplicação do modelo.

4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO NA ANÁLISE DE CRITICIDADE DE UM EQUIPAMENTO INDUSTRIAL

Neste tópico é apresentada uma aplicação do modelo proposto pelo trabalho na classificação e ordenação dos equipamentos críticos de um Sistema de Controle de Tensão Mecânica (SCTM), em uma Máquina Laminadora de uma indústria produtora de embalagens cartonadas assépticas. O objetivo da aplicação foi identificar e selecionar os componentes críticos deste sistema e assim contribuir para a eficácia da manutenção do mesmo e para a disponibilidade geral da planta.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E CONTEXTO OPERACIONAL

Os equipamentos selecionados para análise de criticidade foram os componentes do Sistema de Controle de Tensão Mecânica (SCTM) de uma Laminadora, que compõem o processo de produção de embalagens cartonadas assépticas em uma linha de produção industrial. A empresa onde os dados e informações foram coletados situa-se no sul do estado do Paraná e é uma empresa líder de mercado no seu ramo de atuação. A Laminadora é responsável pela formação da embalagem, onde uma bobina de papel cartonado, após receber impressões de logotipos e artes gráficas na fase de impressão, segue para o processo de laminação onde serão aplicadas quatro camadas de polietileno e uma camada de alumínio, que irão formar a embalagem cartonada asséptica. O Sistema para realizar a tensão mecânica na bobina para que ela receba as camadas de laminação, está inserido dentro de quatro subprocessos da Laminadora, assim designados: Desbobinador de Papel, *Festoon*, Laminador e Embobinador.

No processo de laminação a embalagem, ainda na forma de bobina, é desenrolada pelo desbobinador de papel, seguindo para o *Festoon*, onde essa bobina é temporariamente acumulada em um sistema de cilindros para controle de alimentação do desbobinador, durante o processo de emenda das bobinas a fim de dar continuidade à linha de produção. Em seguida a folha, que é desenrolada da bobina, passa por cilindros laminadores para controle da compressão. A etapa seguinte ocorre no embobinador, onde a folha é enrolada novamente para completar o processo de formação da embalagem.

Durante todo o processo de laminação é fundamental o controle da tensão mecânica da folha, para garantir a qualidade de formação da embalagem e também evitar desperdícios, assim, o controle desta tensão é realizado em todos os equipamentos intermediários da Laminadora, os quais integrados compõem o Sistema de Controle de Tensão Mecânica (SCTM) da máquina.

Rosium (1996) define tensão mecânica como a força mecânica aplicada na “web” (superfície do material) na direção da máquina. O termo “web” pode ser definido como qualquer material puxado através de um rolo (cilindro) em um processo de fabricação. Usualmente, processos de produção ou conversão de papel, filmes plásticos, laminados, têxteis, fios e cabos necessitam de um controle de tensão similar, assim como processos de impressão, revestimento, laminação, corte e de extrusão. Nestes sistemas cada componente ou elemento que toca a linha pode inferir no nível de tensão aplicado. De forma geral as máquinas “web” possuem três zonas para controle de tensão, onde cada uma é controlada de forma independente, apresentadas na figura 16, sendo elas: *unwinder*, *internal* e *rewinder* (DAMOUR, 2004).

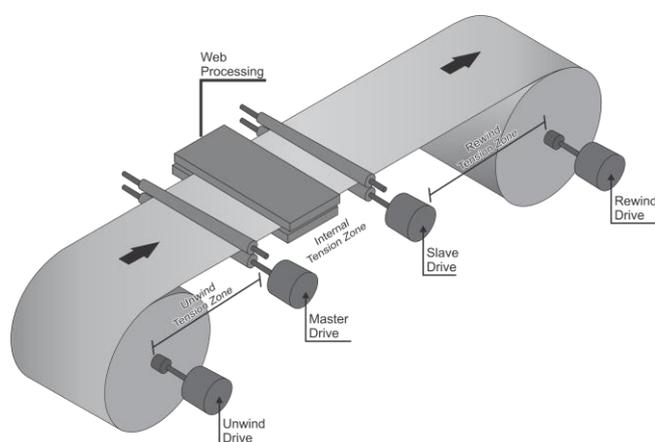


Figura 17 – Zonas de controle de tensão
Fonte: Autor (2015)

A tensão mecânica é controlada de duas formas, em malha fechada, através da realimentação (*feedback*) do sinal de “rolos bailarinos” ou célula de cargas, ou controle em malha aberta, através da diferença de velocidade dos motores entre dois pontos definidos. No controle em malha fechada, o rolo bailarino e a célula de carga compensam às alterações na tensão inerentes a mudança de diâmetro do rolo, durante o processo de desbobinar e embobinar o produto, além de corrigir variações

na tensão ocasionadas pelo sistema de emenda, rolamentos, perdas mecânica as e qualquer outra força que atue sobre a linha “web”.

No sistema selecionado estão presentes as três zonas de aplicação da tensão mecânica. Na *unwind zone*, atua o sistema de tensão do desbobinador e do festoon, na *internal zone* atua o sistema de tensão do laminador e na *rewinder zone* o sistema do embobinador, todos apresentam um controle em malha fechada, comandados pelo CLP (Controlador Lógico Programável) da Laminadora, denominado CLP mestre.

O Desbobinador é constituído por um conjunto de pinças e um sistema de giro de torre, que permite que a troca de bobinadas (alimentação) seja realizada com a máquina operando. Sua função é desbobinar os rolos de embalagens com uma tensão fixa de 1000 N (newtons), controlando-a até o *Festoon*, responsável por manter esta tensão até os Laminadores. O *Festoon* também é responsável por acumular 94 metros de papel, para que a emenda seja realizada sem a necessidade de uma parada na linha. O Laminador tem a função de manter a tensão mecânica constante na linha, para garantir a adesão do filme de polietileno no papel e evitar dobras e problemas de aderência do filme no papel. O último sistema é o embobinador, o qual é responsável por tracionar e embobinar a embalagem com uma tensão de 2100 N a uma velocidade de 650 metros/min.

Em todos esses processos o controle de tensão mecânica é realizado através de um sistema de acionamento em corrente contínua, composto por um Drive e um motor, comandados por um CLP, o qual recebe sinal de controle do CLP mestre da Laminadora. No *Festoon* e no Embobinador a realimentação é fornecida por um sensor analógico acoplado ao cilindro bailarino, além dos *encoders* dos motores. No Desbobinador, a realimentação é realizada através do *encoder*, um sensor de pulsos e o sinal oriundo do *Festoon* e no Laminador a realimentação é oriunda de um sistema de células de cargas, na figura 17 é apresentado o esquema de controle do embobinador.

Controlar a tensão do sistema permitirá que o processo seja executado em alta velocidade, sem interferir na qualidade do produto, além de aumentar a qualidade, com uma maior taxa de transferência, sem resíduos e atrasos. Um material com uma tensão acima do limite elástico do material pode danificá-lo ou quebrar (rasgar) o material, necessidade de desligar a máquina e reiniciar o processo. Já uma tensão muito baixa pode resultar em dobras do material, falha de registro durante a impressão, telescopamento e afrouxamento (ROSIUM, 1996; DAMOUR, 2004).

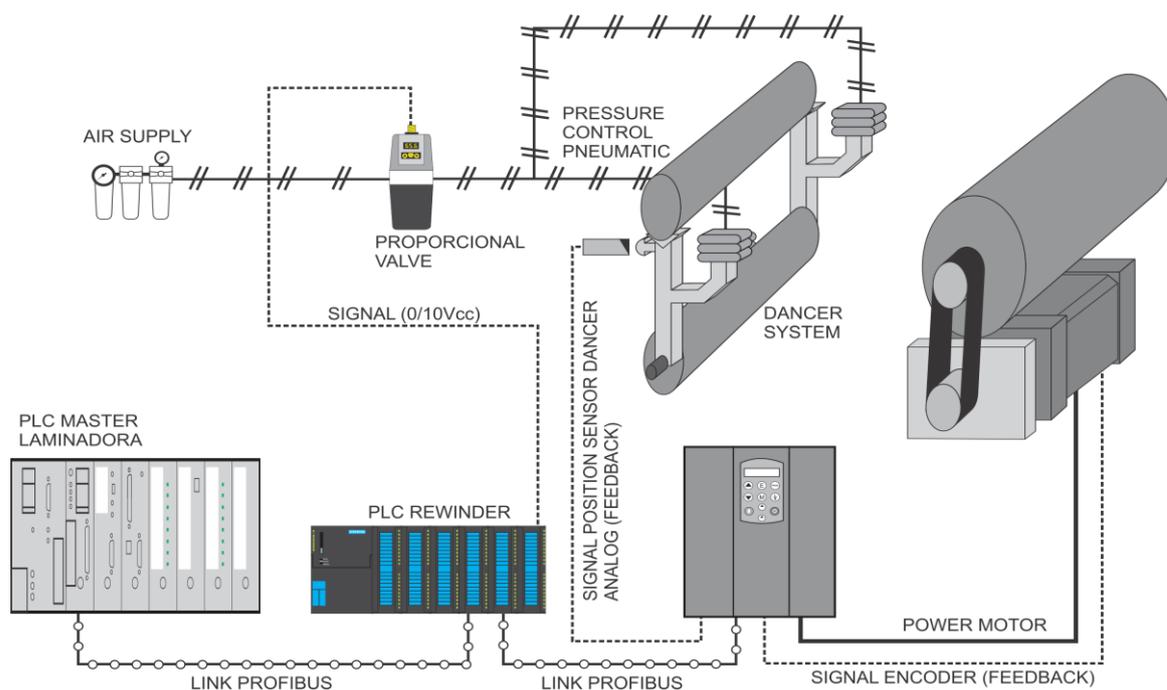


Figura 18 – Controle de tensão do embobinador
Fonte: Autor (2015)

O número de componentes presentes em cada subprocesso que compõe o SCTM é elevado, de forma que priorizar todos seria inviável sob qualquer aspecto avaliado, assim inicialmente classificar os componentes críticos será fundamental para a manutenção, pois isso indicará quais componentes que apresentam pontos comuns relativos ao modo operatório e à criticidade, além de contribuir para seleção das atividades de manutenção e técnicas que deverão ser aplicadas, política de preditiva e preventiva e controle de *spare parts*. Além disso, a análise de criticidade servirá como base na aplicação de metodologias de prevenção de falhas como o MCC e FMECA.

Os atores que foram consultados para o trabalho fazem parte da equipe técnica de manutenção da empresa e profissionais de outros setores, essenciais para este tipo de análise, tais como: operação, qualidade e segurança. Cada profissional participou em todo o processo de análise através dos conhecimentos específicos necessários a cada etapa.

O problema possui uma natureza multidimensional, onde vários fatores contribuem e concorrem na criticidade do componente, fatores que justificam a escolha de uma ferramenta multicritério na resolução deste problema.

4.2 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS

A escolha dos critérios foi realizada em razão das características do processo, objetivos da empresa e diretrizes de manutenção, feita de forma consensual entre todos os atores envolvidos, através de reuniões com os decisores, stakeholders e demais interessados no processo SCTM. Foram selecionados sete critérios para ponderar as avaliações das alternativas, sendo três deles de natureza qualitativa, onde a avaliação é realizada através da experiência dos especialistas, e quatro apresentam uma avaliação quantitativa, baseada em um banco de dados de informações sobre os componentes do SCTM. O quadro 5 apresenta os critérios selecionados nesta aplicação:

Quadro 5 – Critérios selecionados para aplicação

Critério	Descrição	Objetivo	Unidade	Avaliação
g₁	Risco a segurança	Maximizar	Pontos	Subjetiva
g₂	Indisponibilidade da produção	Maximizar	Minutos	Quantitativa
g₃	Impacto na qualidade do produto	Maximizar	Pontos	Subjetiva
g₄	Riscos Ambientais	Maximizar	Pontos	Subjetiva
g₅	Tempo médio de reparo (MTTR)	Maximizar	Horas	Quantitativa
g₆	Tempo médio entre falhas (MTBF)	Minimizar	Horas	Quantitativa
g₇	Custo da manutenção	Maximizar	R\$	Quantitativa

Fonte: Autor (2015)

Os critérios qualitativos (g_1 , g_3 e g_4) foram avaliados com base em uma escala ordinal com valor máximo 5, e valor mínimo 1. Este tipo de avaliação é amplamente difundido na classificação de riscos na área de manutenção, originalmente derivado da norma militar americana MIL-STD-882D.

Como o objetivo consistia em identificar os equipamentos críticos, todos os critérios foram maximizados, isto é, quanto maior o valor, mais crítico é o equipamento perante o critério, com exceção do critério de Tempo Médio entre Falhas (g_6), no qual o impacto sobre a criticidade é inversamente proporcional ao valor do critério.

Apesar da dependência entre os critérios indisponibilidade (g_2), MTTR (g_5) e MTBF (g_6), os decisores optaram por utilizá-los uma vez que cada reflete características distintas do equipamento. Por exemplo, mesmo que dois equipamentos possuam o

mesmo desempenho no critério MTTR (g_5), a indisponibilidade (g_2) de cada um será diferente, em função de outras características como: tempo de setup, troca de ferramentas e ajustes de operação.

Critério g_1 – Riscos à segurança: Avalia o impacto da alternativa em relação à segurança dos colaboradores e demais envolvidos no processo, pontuado conforme quadro 6.

Quadro 6 – Pontuação para o critério g_1

Valor	Descrição
5	Risco de uma lesão grave
4	Risco de um acidente com afastamento
3	Risco de lesão sem afastamento
2	Mínimo risco de lesão
1	Sem risco

Fonte: Autor (2015)

Critério g_3 – Impacto na qualidade do produto: Avalia a alternativa com base no seu impacto sobre a qualidade do produto, a qual pode ocasionar desde uma reclamação externa do cliente, no caso de uma falha não detectada a perdas internas de material e matéria-prima. Este critério é pontuado conforme quadro 7.

Quadro 7 – Pontuação para o critério g_3

Valor	Descrição
5	Reclamação externa (cliente) / Não detectável
4	Refugo de material
3	Apresenta perdas internas (retrabalho)
2	Impacto aceitável
1	Sem perdas na qualidade

Fonte: Autor (2015)

Critério g_4 – Riscos ambientais: Avalia a alternativa com base no impacto que possa causar ao meio-ambiente e local da instalação, pontuado conforme quadro 8.

Quadro 8 – Pontuação para o critério g_4

Valor	Descrição
5	Contaminação externa com risco à sociedade
4	Contaminação externa sem risco à sociedade
3	Contaminação interna
2	Dentro dos limites aceitáveis
1	Sem contaminação

Fonte: Autor (2015)

Critério g_2 – Tempo de indisponibilidade da produção: Refere-se tempo médio de indisponibilidade da linha (sem produção) devido a uma falha ou baixo desempenho do equipamento. A indisponibilidade da produção considera o tempo de reparo do ativo após sua falha, agregado ao tempo necessário para colocar o equipamento em regime de operação (tempo de *setup*, parametrização e ajustes). Para o cálculo da indisponibilidade da produção foi utilizada a equação 29.

$$MDT = \frac{\sum_{i=1}^n Dti}{n} \quad (29)$$

onde:

MDT – *Medium Down Time* (Tempo médio de indisponibilidade da produção), expresso em horas;

DTi – é o tempo indisponível, contado a partir da 1ª falha do período de referência, expresso em horas;

n – é o número de falhas ocorridas no período de referência, ou número de ações corretivas;

Critério g_5 – Tempo Médio Entre Falhas (TMEF): Este critério é uma medida básica de confiabilidade referente à vida média de uma população. Descreve o tempo esperado entre duas falhas consecutivas para um equipamento ou sistema. Pode ser apresentado pelo termo em inglês *Mean Time Between Failures* (MTBF) (KARDEC & NASCIF, 2010).

O TMEF é calculado através da equação 30:

$$TMEF \text{ ou } MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} TEFi}{n-1} \quad (30)$$

onde:

TMEF – Tempo médio entre falhas, expresso em horas;

TEF – é o tempo entre falhas, ou tempo de disponível de produção, contado a partir da 1ª falha do período de referência, expresso em horas;

n – é o número de falhas ocorridas no período de referência;

Critério g_6 – Tempo médio para reparos (TMPR): Apresenta a média dos tempos de reparos ponderados pela probabilidade de ocorrência, ou seja, o tempo médio necessário para execução de um reparo após a falha do ativo. Pode ser representado pela sigla MTTR, do inglês *Mean Time to Repair*.

O TMPR é calculado através da equação 31:

$$TMPR \text{ ou } MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n TTR_i}{n} \quad (31)$$

onde:

TMPR – Tempo médio para reparo, expresso em horas;

TTR_i – é o tempo de reparo, contado a partir da 1ª falha do período de referência, expresso em horas;

n – é o número de falhas ocorridas no período de referência;

A figura 18 apresenta um exemplo para ilustrar o cálculo dos critérios g_2 , g_5 e g_6 .

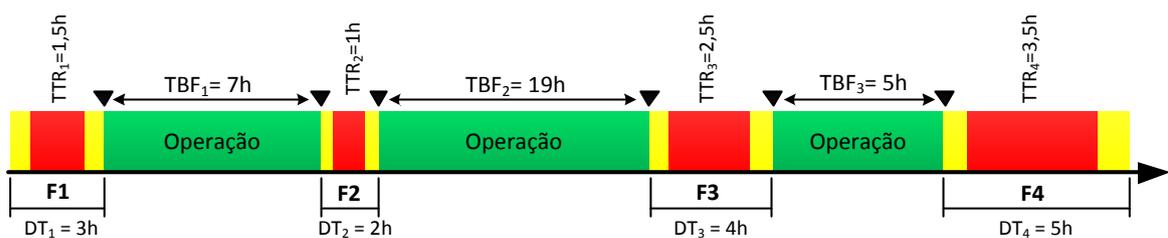


Figura 19 – Exemplo de cálculo dos critérios MTBF, MTTR e DT
Fonte: Autor (2015)

Cálculo de g_2 :

$$MDT = \frac{MDT_1 + MDT_2 + MDT_3 + MDT_4}{4} = \frac{14}{4} = 3,5h$$

Cálculo de g_5 :

$$MTBF = \frac{TBF_1 + TBF_2 + TBF_3}{4 - 1} = \frac{14}{3} = 10,3h$$

Cálculo de g_6 :

$$MTTR = \frac{TTR_1 + TTR_2 + TTR_3 + TTR_4}{4} = \frac{8,5}{4} = 2,125 h$$

Critério g_7 – Custo da Manutenção: Realiza uma avaliação com base no custo da manutenção da alternativa, expresso em reais (R\$), onde foram considerados os seguintes fatores: custo do componente e peças de reparo, materiais de consumo necessários e custo da hora técnica necessária.

4.2.1 Definição dos pesos dos critérios

Neste trabalho os decisores optaram por utilizar como ferramenta na hierarquização dos critérios a Técnica de Avaliação Numérica de Relações Funcionais de Mudge. O método foi escolhido em razão de já ser utilizado na empresa na identificação e hierarquização de critérios e por ser inteligível a todos os envolvidos no processo de análise.

Este método compara os critérios entre si, e identifica quanto o critério em análise é mais importante sobre o par, com auxílio de um fator de pontuação discriminado conforme a seguir:

- 5 – Função ou critério com muito mais importância sobre seu par;
- 3 – Função ou critério moderadamente mais importante sobre seu par;
- 1 – Função ou critério com pouco importância sobre seu par;

Para determinar os pesos de cada critério, somam-se os pontos obtidos por cada critério e divide-se pelo somatório de todos os pontos da tabela. A tabela 02 apresenta a classificação dos critérios utilizando o método de Mudge.

Tabela 2 – Hierarquização dos critérios

	B	C	D	E	F	G	SOMA	%	
Critério g₁ Riscos à segurança	A	A1	A1	A3	A3	A3	A5	16	29.09%
Critério g₂ Indisponibilidade	B	C1	B1	B3	B3	B3		10	18.18%
Critério g₃ Impacto na qualidade do produto		C	C3	C3	C3	C3		13	23.64%
Critério g₄ Riscos ambientais			D	E3	F3	D3		3	5.45%
Critério g₅ Tempo Médio de Reparo				E	E1	G3		4	7.27%
Critério g₆ Tempo Médio entre Falhas					F	F3		6	10.91%
Critério g₇ Custos de Manutenção						G		3	5.54%
Fonte: Autor (2015)						TOTAL	55	100.00%	

O fato do critério de meio-ambiente apresentar um peso baixo na avaliação dos decisores é devido a todos os equipamentos que compõem o sistema analisado apresentarem um risco ambiental extremamente baixo e controlado. Contudo a opção de manter o critério na análise reside no fato do mesmo ser utilizado para toda a fábrica, onde para sistemas e equipamentos diferentes possui um peso relativamente maior.

Os maiores pesos concentram-se nos critérios, os quais, na visão do decisor apresentam um impacto direto em toda empresa, tanto interna quanto externamente. Os critérios MTBF e MTTR apresentaram um peso intermediário em razão da equipe de análise ser multidisciplinar e também por seu impacto estar refletido no critério indisponibilidade.

O critério de custo também apresentou um peso baixo, pois a análise deste limitou-se somente ao custo de manutenção de uma possível falha do equipamento, sendo que não foram contemplados os custos decorrentes dessa falha, como: atrasos na produção, perda de matéria-prima, perda de material, o que poderia aumentar consideravelmente seu peso.

4.3 CATEGORIAS DE AVALIAÇÃO

Após identificar os critérios, foi necessário identificar quais serão as categorias (classes) e elucidar as características de cada, tendo como base a criticidade do equipamento, as quais fornecerão uma recomendação de ação para os decisores. Os modelos tradicionais de avaliação utilizados classificavam os equipamentos em três categorias distintas de criticidade: Alta, média e baixa.

Com objetivo de aprimorar a análise e o planejamento de ações da manutenção sobre o equipamento, os decisores optaram por utilizar quatro classes de criticidade na análise. Estas classes foram identificadas em C1, C2, C3 e C4, sendo apresentadas no quadro 09.

Quadro 9 – Classes de Criticidade

Classes	Criticidade	Risco/Ação	Plano de Ação
Classe A	Altíssima	Não Tolerável Imediata	Manutenção Preditiva e Preventiva; Melhorias focadas; Análise de Falhas; Análise RCM; Análise Engenharia de Manutenção, Manutenção Planejada e Autônoma; Re-projeto;
Classe B	Alta	Não Tolerável Curto Prazo	Manutenção Preditiva e Preventiva; Melhorias focadas; Análise de Falhas; Análise Engenharia de Manutenção, Manutenção Planejada e Autônoma;
Classe C	Média	Tolerável Médio Prazo	Manutenção Preventiva; Análise de Falhas; Análise Manutenção Planejada e Autônoma; Monitoramento de quebras;
Classe D	Baixa	Aceitável Longo Prazo	Manutenção Corretiva; Monitoramento de quebras; Análise Manutenção Planejada;

Fonte: Autor (2015)

A inclusão de uma classe altíssima na avaliação permitiu uma análise mais detalhada nos equipamentos que possuem uma maior criticidade, destacando entre eles os que exigem uma atuação imediata da manutenção, por apresentarem fatores de risco tais como segurança ou qualidade do produto. Outro ponto positivo observado pela mudança, foi a alteração no limite da classe inferior, de forma a garantir que os equipamentos alocados na “classe D” possuam os valores mínimos nos critérios observados.

4.4 IDENTIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

As alternativas do problema consistem nos equipamentos e itens que compõem o SCTM da Laminadora, identificados através da estrutura hierárquica dos equipamentos do sistema de gestão da empresa. Cada um dos processos está dividido em sistemas menores conforme a natureza técnica e operacional dos equipamentos e componentes. A figura 19 apresenta a estrutura hierárquica utilizada. O resultado da avaliação pode ser observado na matriz de avaliação conforme quadro 10.

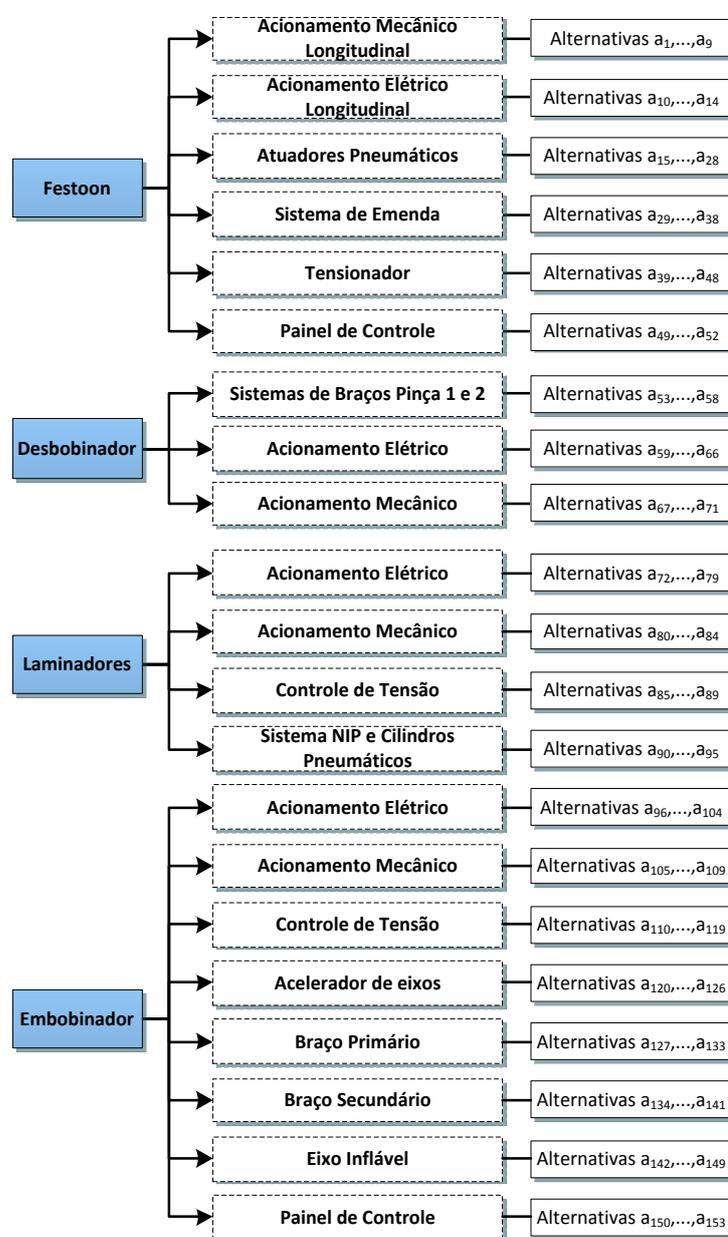


Figura 20 – Estrutura hierárquica do Sistema de Tensionamento
Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de Avaliação

Componente	Alternativa	<i>Risco</i>	<i>Indisponi</i>	<i>Qualidade</i>	<i>Meio-</i>	<i>MTTR</i>	<i>MTBF</i>	<i>Custos</i>
		<i>segurança</i>	<i>bilidade</i>		<i>ambiente</i>			
		<i>g₁</i>	<i>g₂</i>	<i>g₃</i>	<i>g₄</i>	<i>g₅</i>	<i>g₆</i>	<i>g₇</i>
Motor AC	a1	4	178.08	5	1	1.88	4492.00	7434.26
<i>Encoder Incremental</i>	a2	2	489.72	2	1	5.17	10107.00	3964.19
Drive Motor	a3	3	311.64	3	1	3.29	10107.00	5850.83
Cabos de alimentação	a4	5	187.62	4	1	2.35	33690.00	1080.89
Ventilador	a5	3	37.52	2	1	0.47	20214.00	350.94
Conversor AC/DC	a6	3	311.64	3	1	3.29	10668.50	4166.33
Chave Seccionadora	a7	4	60.04	2	1	0.75	20214.00	1392.52
Fusíveis	a8	3	37.52	2	1	0.47	9545.50	283.56
Sensores Indutivos e Fim de curso	a9	1	112.57	2	1	1.41	10443.90	266.71
Fuso/Buchas	a10	2	400.68	3	1	4.23	21337.00	3672.21
Rolamentos	a11	2	445.20	3	1	4.70	21337.00	1628.35
Correias Sincronizadas	a12	3	187.62	3	1	2.35	16845.00	631.69
Polias	a13	3	150.10	3	1	1.88	10107.00	336.90
Controle de tensão	a14	4	187.62	5	1	2.35	21337.00	519.39
Articulações	a15	4	150.10	3	1	1.88	24706.00	1212.84
Sensores indutivos analógicos / atuadores	a16	2	187.62	3	1	2.35	21337.00	800.14
Reservatório de Ar	a17	2	55.97	3	1	2.82	6738.00	308.83
Válvula Proporcional	a18	3	174.90	3	2	2.35	10668.50	743.99
Conversor E/P	a19	1	60.04	2	1	0.75	2470.60	1729.42

Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de Avaliação (continuação)

Componente	Alternativa	Risco	Indisponi	Qualidade	Meio-	MTTR	MTBF	Custos
		segurança	bilidade		ambiente			
		<i>g₁</i>	<i>g₂</i>	<i>g₃</i>	<i>g₄</i>	<i>g₅</i>	<i>g₆</i>	<i>g₇</i>
Pressostatos	a20	1	60.04	1	1	0.75	10668.50	336.90
Mangueira / conexões	a21	2	60.04	2	1	0.75	17968.00	471.66
Placa analógica do S7 I/O	a22	2	187.62	3	1	2.35	6738.00	631.69
Sensores de Pulso das Pinças	a23	1	150.10	2	1	1.88	4716.60	505.35
Processamento e programa	a24	3	187.62	3	1	2.35	5053.50	70.19
Modulo Link Desbobinador de Papel	a25	3	187.62	3	1	2.35	4716.60	1600.28
Modulo Link Sala elétrica de Papel	a26	3	187.62	3	1	2.35	4716.60	1600.28
Rede Profibus / CPU S5	a27	3	187.62	3	1	2.35	5053.50	1993.33
Fibras ópticas	a28	4	225.14	3	1	2.82	1684.50	758.03
Freio, disco e pastilha	a29	2	225.14	3	1	2.82	3930.50	533.43
Válvula Proporcional	a30	1	60.04	2	1	0.75	2470.60	1729.42
Mangueira/ conexões pneumáticas	a31	1	76.82	1	1	0.94	17572.80	466.78
Cilindro de Borracha (<i>Ruber Roll</i>)	a32	4	192.05	5	1	2.35	3294.90	1784.74
Cilindros Pneumáticos	a33	1	107.42	2	1	1.61	13728.75	634.27
Bompas de vácuo	a34	2	192.05	1	2	2.69	32949.00	727.62
Ventosas/ mangueiras e conexões	a35	1	35.81	1	1	0.54	4612.86	969.25
<i>Bumpers</i>	a36	3	115.23	3	1	1.61	4612.86	1488.20
Facas	a37	5	115.23	4	1	1.61	3294.90	480.51
Barras Paralelas	a38	3	153.64	1	1	2.15	4612.86	713.90

Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de avaliação (continuação)

Componente	Alternativa	<i>Risco</i>	<i>Indisponi</i>	<i>Qualidade</i>	<i>Meio-</i>	<i>MTTR</i>	<i>MTBF</i>	<i>Custos</i>
		<i>segurança</i>	<i>bilidade</i>		<i>ambiente</i>			
		<i>g1</i>	<i>g2</i>	<i>g3</i>	<i>g4</i>	<i>g5</i>	<i>g6</i>	<i>g7</i>
Bombas de vácuo	a39	1	153.64	2	1	2.15	32949.00	1043.39
Câmara de vácuo	a40	2	192.05	3	1	2.69	3294.90	562.88
Mangueiras e conexões	a41	1	61.45	1	1	0.86	17572.80	461.29
Motor AC	a42	4	182.28	5	1	2.15	10433.85	7270.75
Encoder/ Correia e polias	a43	2	192.05	1	1	2.69	16474.50	1477.21
Drive AC	a44	4	273.42	5	1	3.23	3844.05	5689.19
Chave seccionadora	a45	4	38.41	2	1	0.54	21966.00	1345.42
Cilindro <i>Dry Roller</i>	a46	4	455.70	3	1	5.38	35145.60	5052.18
Correias/ Polias	a47	1	153.64	2	1	2.15	13179.60	549.15
Filtro de Ar	a48	1	35.81	1	2	0.54	1317.96	398.13
Componentes eletromecânicos	a49	3	153.64	3	1	2.15	16474.50	494.24
Ventiladores	a50	1	57.29	2	1	0.86	21966.00	153.76
Galvanômetros	a51	1	31.75	1	1	0.54	27457.50	321.25
Conexões elétricas	a52	3	50.79	3	1	0.86	32949.00	461.29
Pinça (Castanha)	a53	4	170.27	2	1	2.69	21966.00	562.88
Freio Pneumático/ disco / Pastilhas	a54	3	170.27	2	1	2.69	10433.85	288.30
Válvulas Pneumáticas	a55	3	50.79	2	1	0.86	2416.26	241.63
Mangueiras e conexões	a56	1	50.79	1	1	0.86	17572.80	461.29
Guias lineares	a57	2	170.27	2	1	2.69	16474.50	2114.23
Fusos / buchas	a58	2	282.83	2	1	3.76	19769.40	1070.84

Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de avaliação (continuação)

Componente	Alternativa	<i>Risco segurança</i> g₁	<i>Indisponi- bilidade</i> g₂	<i>Qualidade</i> g₃	<i>Meio- ambiente</i> g₄	<i>MTTR</i> g₅	<i>MTBF</i> g₆	<i>Custos</i> g₇
Motor DC	a59	4	202.02	5	1	2.69	4393.20	7303.70
Drive DC	a60	3	204.33	4	1	3.11	20318.55	2833.61
Coletor/Escovas	a61	5	363.64	4	1	4.67	9767.24	2745.11
Taco gerador	a62	1	102.16	2	1	1.56	3598.46	244.18
Cabos e conexões elétricas	a63	5	54.49	4	1	0.83	30843.90	431.81
Ventilação do motor DC	a64	3	54.49	3	1	0.83	18506.34	143.94
Caixa de conexões elétricas	a65	3	54.49	3	1	0.83	4626.59	431.81
Indutores Filtros	a66	1	34.05	2	1	0.52	12337.56	539.77
Redutor	a67	5	282.83	4	1	3.63	22618.86	3505.92
Corrente/ Polia/ Acoplamento	a68	5	238.38	4	3	3.63	22618.86	1516.49
Transmissão da pinça	a69	3	136.22	3	1	2.08	18506.34	1542.20
Base de fixação	a70	5	301.73	4	3	4.15	41125.20	3845.21
Rolamento	a71	2	158.95	3	1	2.60	41125.20	269.88
Motor DC	a72	4	188.58	5	1	2.60	4112.52	6837.06
Drive	a73	3	190.74	3	1	3.11	19020.41	5325.71
Taco Gerador	a74	1	95.37	2	1	1.56	3598.46	244.18
Link	a75	3	158.95	3	1	2.60	3598.46	1465.09
Ventilação do motor DC	a76	3	60.77	3	1	0.83	18506.34	143.94
Cabos e conexões	a77	3	60.77	3	1	0.83	4112.52	431.81

Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de avaliação (continuação)

Componente	Alternativa	<i>Risco</i>	<i>Indisponi</i>	<i>Qualidade</i>	<i>Meio-</i>	<i>MTTR</i>	<i>MTBF</i>	<i>Custos</i>
		<i>segurança</i>	<i>bilidade</i>		<i>ambiente</i>			
		<i>g1</i>	<i>g2</i>	<i>g3</i>	<i>g4</i>	<i>g5</i>	<i>g6</i>	<i>g7</i>
Indutores	a78	1	113.95	2	1	1.56	12337.56	1187.49
Processamento do drive	a79	3	189.92	3	1	2.60	9253.17	64.26
Redutor	a80	4	189.92	4	3	2.60	22618.86	3444.24
Correia sincronizada / Polias/ Acoplamento	a81	1	113.95	2	1	1.56	4318.15	346.99
Mancais/ buchas / rolamentos	a82	3	189.92	3	1	2.60	15421.95	1362.27
Base de fixação	a83	4	227.91	3	1	3.11	22618.86	488.36
Acoplamento	a84	1	113.95	2	1	1.56	18506.34	501.21
Célula de carga	a85	3	189.92	3	1	2.42	4318.15	2698.84
Conversor/ Transdutor	a86	1	60.77	2	1	0.77	15421.95	1151.51
Link/ Processamento	a87	2	189.92	3	1	2.42	9253.17	64.26
Sensor indutivos de posição do NIP	a88	1	113.95	2	1	1.45	9561.61	346.99
Base das células de carga	a89	1	84.98	1	1	1.16	22618.86	390.69
Mancais/ Rolamentos / Buchas	a90	3	84.98	3	1	1.16	3598.46	544.91
Cilindro NIP	a91	3	70.82	3	1	0.97	1130.94	8800.79
Mangueiras/ válvulas/ Conexões	a92	1	75.97	2	1	0.97	16450.08	436.96
Indicador de pressão	a93	2	75.64	5	2	1.16	15421.95	524.35
Regulador de pressão/ Manômetros	a94	2	54.09	5	2	0.77	15421.95	514.07
Cilindros pneumáticos	a95	1	101.42	2	1	1.45	12851.63	501.21
Motor AC	a96	3	135.23	3	1	1.93	9767.24	6806.22

Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de avaliação (continuação)

Componente	Alternativa	Risco	Indisponi	Qualidade	Meio-	MTTR	MTBF	Custos
		segurança	bilidade		ambiente			
		<i>g1</i>	<i>g2</i>	<i>g3</i>	<i>g4</i>	<i>g5</i>	<i>g6</i>	<i>g7</i>
Drive AC	a97	3	202.84	3	1	2.90	19020.41	5325.71
Encoder	a98	2	169.04	2	1	2.42	15421.95	951.02
Cabos / conexões	a99	3	54.09	3	1	0.77	4112.52	431.81
Ventilação	a100	1	54.09	2	1	0.77	18506.34	143.94
Dissipador de energia (Resistor)	a101	3	33.81	2	1	0.48	15421.95	64.26
Rede <i>Profibus</i> / Placas de comunicação	a102	2	169.04	3	1	2.42	3598.46	1465.09
Fusíveis	a103	1	31.52	2	1	0.48	8351.25	385.63
Contator	a104	1	33.81	2	1	0.48	3930.00	130.18
Cilindro POP	a105	5	481.32	4	1	5.80	32422.50	12634.95
Redutor	a106	4	441.21	3	1	5.32	21615.00	3664.73
Correia / Polia	a107	4	354.82	3	1	3.87	14737.50	540.38
Mancais / Rolamento	a108	4	399.17	3	1	4.35	14737.50	2623.28
Base fixação	a109	2	204.33	3	1	2.90	21615.00	368.44
Cilindro contra pressão	a110	4	170.27	5	1	2.42	4912.50	1891.31
Bailarino	a111	3	136.22	4	1	1.93	32422.50	1572.00
Válvula Proporcional	a112	1	54.49	2	1	0.77	2161.50	1513.05
Transdutor de pressão	a113	1	76.19	2	1	1.16	32422.50	501.08
Sensor Indutivo analógico	a114	2	202.02	3	1	2.42	5895.00	700.03
Placa analógica S7 I/O	a115	1	136.22	2	1	1.93	5895.00	687.75

Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de avaliação (continuação)

Componente	Alternativa	<i>Risco</i>	<i>Indisponi</i>	<i>Qualidade</i>	<i>Meio-</i>	<i>MTTR</i>	<i>MTBF</i>	<i>Custos</i>
		<i>segurança</i>	<i>bilidade</i>		<i>ambiente</i>			
		<i>g1</i>	<i>g2</i>	<i>g3</i>	<i>g4</i>	<i>g5</i>	<i>g6</i>	<i>g7</i>
Atuador Pneumático	a116	4	136.22	3	1	1.93	2238.50	508.75
Articulações/ Bucha/ Rolamento	a117	3	170.27	3	1	2.42	15262.50	724.97
Processamento S7	a118	2	170.27	3	1	2.42	9157.50	979.34
Válvulas/ mangueiras/ conexões	a119	1	63.49	2	1	0.97	4578.75	432.44
motor AC	a120	3	136.22	3	1	1.93	4070.00	1424.50
Drive	a121	3	204.33	3	1	2.90	18823.75	2187.63
Placa de comunicação <i>Profibus</i>	a122	2	170.27	3	1	2.42	3561.25	1449.94
Articulação Braço	a123	2	63.49	3	1	0.97	12210.00	686.81
Correia / Polia transmissão/ Polia contato	a124	1	63.49	2	1	1.04	15262.50	534.19
Mangueiras / válvulas / conexões	a125	3	50.79	3	1	0.83	16280.00	427.35
Cilindros Pneumáticos	a126	1	102.16	2	1	1.56	12718.75	496.03
Guias Eixos	a127	3	193.46	3	1	2.60	22385.00	3612.13
Válvula Proporcional Hidráulica	a128	2	61.91	3	3	0.83	15262.50	1872.20
Cilindros hidráulicos	a129	4	232.15	4	3	3.11	1119.25	1984.13
Conexões / mangueiras hidráulicas	a130	4	15.48	4	3	0.21	2035.00	462.96
Articulação/ buchas	a131	3	193.46	3	1	2.60	3561.25	724.97
Bomba hidráulica	a132	4	154.77	2	3	2.08	22893.75	3378.10
Válvula direcional	a133	2	57.71	3	3	0.83	18315.00	1343.10
Válvula Proporcional Hidráulica	a134	2	61.91	3	3	0.83	15262.50	1872.20

Fonte: Autor (2015)

Quadro 10 – Matriz de avaliação (continuação)

Componente	Alternativa	<i>Risco</i>	<i>Indisponi</i>	<i>Qualidade</i>	<i>Meio-</i>	<i>MTTR</i>	<i>MTBF</i>	<i>Custos</i>
		<i>segurança</i>	<i>bilidade</i>		<i>ambiente</i>			
		<i>g₁</i>	<i>g₂</i>	<i>g₃</i>	<i>g₄</i>	<i>g₅</i>	<i>g₆</i>	<i>g₇</i>
Válvula direcional	a135	2	57.71	3	3	0.83	18315.00	1343.10
Cilindro Hidráulico	a136	4	193.46	2	3	2.73	12718.75	3001.63
Mangueiras/ conexões	a137	3	36.07	2	1	0.55	16280.00	470.59
Bomba hidráulica	a138	4	154.77	2	3	2.19	22893.75	3683.35
Correias Sincronizadas	a139	3	116.08	3	1	1.64	15262.50	1907.81
Polias/ Rolamentos	a140	1	154.77	2	1	2.19	9157.50	661.38
Guias	a141	2	193.46	3	1	2.73	18315.00	3001.63
Câmaras / válvulas do eixo	a142	5	57.71	4	1	0.87	1322.75	610.50
Mancais/ Rolamento	a143	3	193.46	3	1	2.73	15262.50	521.47
Inflador	a144	3	36.07	2	1	0.55	1017.50	521.47
Mangueiras e conexões	a145	3	31.38	2	1	0.48	4578.75	470.59
Ponteira do inflador	a146	3	31.38	2	1	0.48	1017.50	521.47
Sensor indutivo	a147	1	67.33	2	1	0.95	1526.25	228.94
Pressostato	a148	1	53.86	2	1	0.76	12718.75	508.75
Válvula direcional	a149	1	50.21	2	1	0.76	18315.00	223.85
CPU S7/ Processamento	a150	2	168.33	3	1	2.38	9157.50	1653.44
CPU 342 <i>Profibus</i>	a151	2	168.33	3	1	2.38	3561.25	2670.94
Conexões elétricas	a152	1	31.38	2	1	0.48	30525.00	470.59
Rede <i>Profibus</i> / cabos e terminações	a153	3	168.33	3	1	2.38	3561.25	653.74

Fonte: Autor (2015)

4.5 MODELAGEM DE PREFERÊNCIAS

Após o preenchimento da matriz de avaliação, o passo seguinte foi normalizar as ordenações qualitativas apresentadas dos critérios g_1 , g_3 e g_4 , transformando-os em valores numéricos. O mesmo procedimento foi adotado para os critérios g_2 , g_5 , g_6 e g_7 .

Para utilizar o ELECTRE TRI é necessária uma escala que represente cardinalmente o desempenho de uma alternativa em razão dos critérios. Assim, optou-se por uma escala (0 a 100), onde o desempenho da alternativa é calculado em relação ao valor médio ou valor máximo do conjunto em questão.

Nos critérios de Indisponibilidade, MTBF e Custo de Manutenção, quando o desempenho da alternativa ultrapassa o valor médio é atribuído o valor máximo da escala (100). Nos casos em que o desempenho da alternativa é inferior ao valor médio, o valor atribuído é calculado pela relação entre o valor e a média multiplicados por 100. A utilização deste método foi necessário afim de evitar possíveis distorções nos casos em que o desempenho de uma alternativa é muito superior em relação ao conjunto médio de valores apresentado por determinada classe. Nos demais critérios foi considerado o valor máximo de desempenho para realização dos cálculos. A tabela 03 apresenta uma prévia dos procedimentos descritos acima. A tabela completa pode ser consultada no apêndice A do trabalho.

Para aplicação do método foi necessário estabelecer as regiões limítrofes de entre cada uma das classes estabelecidas. Como foram selecionadas 04 classes de criticidade, foram definidas 03 fronteiras de referência entre elas, todas definidas pelos decisores e equipe de análise, conforme tabela 04.

Os limites de preferência (p_j) e indiferença (q_j) também foram definidos nesta etapa. O limiar de indiferença (q_j) estabelece o maior valor no desempenho da alternativa, onde a situação de indiferença é validade entre duas alternativas (a e a'), $q_j = g_j(a) - g_j(a')$. Para calculá-lo compara-se, par a par, todos os níveis de cada critério verificando as situações de indiferença, sendo que a situação que apresentar o maior valor será definida como limite de indiferença.

Para os critérios g_1 , g_3 e g_5 foi adotado um limite de indiferença (q_j) nulo, uma vez, que não foram encontradas situações de indiferença devido a forma que foram ordenados os critérios. Nos demais critérios foi estabelecido como limite de indiferença (q_j) o valor 3.

Tabela 3 – Padronização da Matriz de Avaliação

Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a ₁	4	80	178.08	100.00	5	100	1	33.33	1.88	32.41	4492.00	33.78	7434.26	100.00
a ₂	2	40	489.72	100.00	2	40	1	33.33	5.17	89.14	10107.00	76.02	3964.19	100.00
a ₃	3	60	311.64	100.00	3	60	1	33.33	3.29	56.72	10107.00	76.02	5850.83	100.00
a ₄	5	100	187.62	100.00	4	80	1	33.33	2.35	40.52	33690.00	100.00	1080.89	69.56
a ₅	3	60	37.52	25.53	2	40	1	33.33	0.47	8.10	20214.00	100.00	350.94	22.58
a ₆	3	60	311.64	100.00	3	60	1	33.33	3.29	56.72	10668.50	80.24	4166.33	100.00
a ₇	4	80	60.04	40.84	2	40	1	33.33	0.75	12.97	20214.00	100.00	1392.52	89.61
a ₈	3	60	37.52	25.53	2	40	1	33.33	0.47	8.10	9545.50	71.79	283.56	18.25
a ₉	1	20	112.57	76.58	2	40	1	33.33	1.41	24.31	10443.90	78.55	266.71	17.16
a ₁₀	2	40	400.68	100.00	3	60	1	33.33	4.23	72.93	21337.00	100.00	3672.21	100.00
a ₁₁	2	40	445.20	100.00	3	60	1	33.33	4.70	81.03	21337.00	100.00	1628.35	100.00
a ₁₂	3	60	187.62	100.00	3	60	1	33.33	2.35	40.52	16845.00	100.00	631.69	40.65
a ₁₃	3	60	150.10	100.00	3	60	1	33.33	1.88	32.41	10107.00	76.02	336.90	21.68
a ₁₄	4	80	187.62	100.00	5	100	1	33.33	2.35	40.52	21337.00	100.00	519.39	33.42
a ₁₅	4	80	150.10	100.00	3	60	1	33.33	1.88	32.41	24706.00	100.00	1212.84	78.05
	5		147		5		3		5,8		13296		1554	
	Máx.		Média		Máx.		Máx.		Máx.		Média		Média	

Fonte: Autor (2015)

Tabela 4 – Perfil limite entre as classes

Classes	Criticidade	Fronteira	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
Classe A	Altíssima	b1	80	85	80	80	90	15	90
Classe B	Alta	b2	60	55	60	60	55	30	65
Classe C	Média	b3	35	30	35	35	25	75	25
Classe D	Baixa	*	--	--	--	--	--	--	--

Fonte: Autor (2015)

O limiar de preferência (p_j) é a menor diferença em que uma situação de preferência estrita ocorre entre duas alternativas (a e a') para determinado critério, onde $p_j = g_j(a) - g_j(a')$. Os valores do limiar de preferência foram definidos pelos decisores e analista com base nos dados apresentados, onde para os critérios g_1 , g_3 e g_5 foi adotado um limite de preferência (p_j) com valor 20, com base na forma de avaliação adotada. Para dos demais critérios adotou-se 10 como valor mínimo na preferência. A tabela 05 apresenta os limiares para as fronteiras estabelecidas:

Tabela 5 – Limites de preferência e indiferença

Fronteira	g_1		g_2		g_3		g_4		g_5		g_6		g_7	
	q_j	p_j												
b1	0	20	3	10	0	20	0	20	3	10	3	10	3	10
b2	0	20	3	10	0	20	0	20	3	10	3	10	3	10
b3	0	20	3	10	0	20	0	20	3	10	3	10	3	10

Fonte: Autor (2015)

Outra definição importante é a direção de preferência dos decisores entre os pares dos níveis de cada escala, onde pode-se escolher por uma preferência crescente, onde a preferência cresce quando o desempenho cresce também, ou decrescente, onde a preferência cresce quando o desempenho da performance diminui. Como o objetivo deste trabalho é classificar e ordenar equipamentos conforme sua criticidade, utilizamos uma direção de preferência crescente para todos os critérios, com exceção ao critério (g_6), MTBF, o qual apresenta uma direção decrescente.

Nesta aplicação optou-se pela não utilização do limite de veto, uma vez que no ELECTRE TRI, o mesmo apresenta uma tendência de alocar uma alternativa em uma classe inferior. Outra consideração é que, na maioria dos critérios, quanto maior o desempenho de uma alternativa, mais crítica é a sua avaliação, assim vetar a inserção desta alternativa em uma classe mais alta, poderia interferir no resultado final, alocando-o em uma classe de menor criticidade.

Todo o processo da matriz de avaliação (avaliação dos decisores, normalização das escalas, modelagem de preferência) foi realizado em um *software* de planilha eletrônica. Esses dados, após sua tabulação, serão entradas dos *softwares* para aplicação do método ELECTRE TRI e PROMETHEE II. A figura 21 ilustra o processo de aplicação do método.

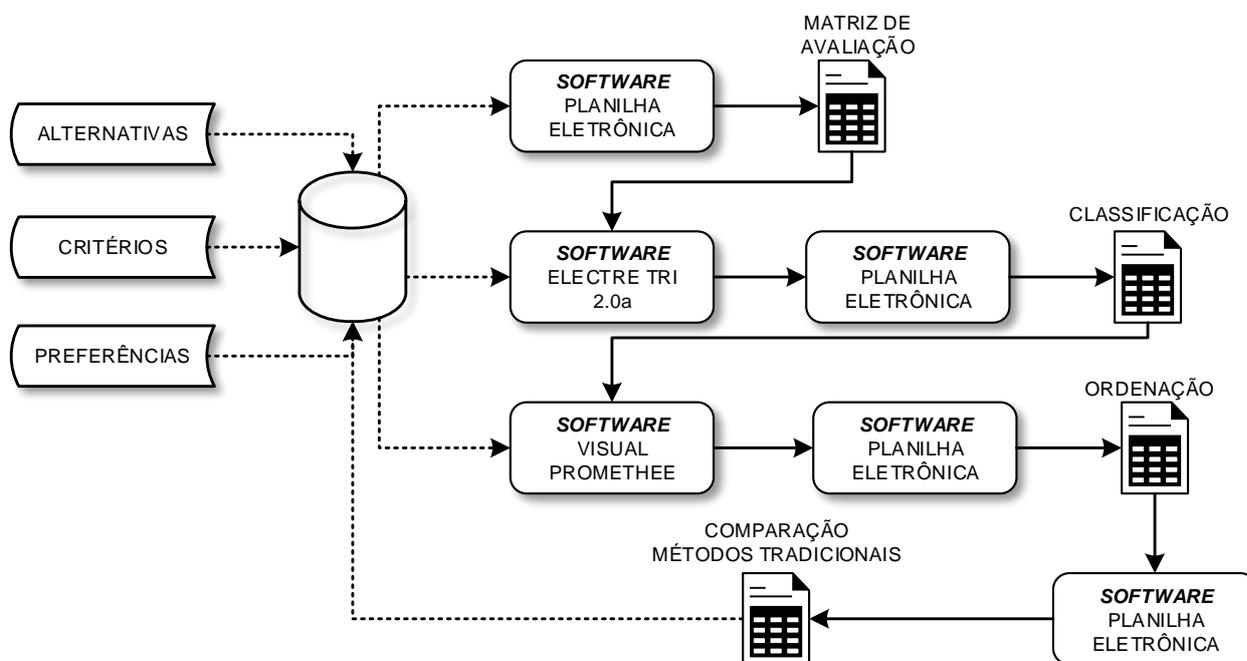


Figura 21 – Diagrama de aplicação do método
Fonte: Autor (2015)

4.6 APLICAÇÃO DO ELECTRE TRI

Com todos os dados tabulados e limites definidos o passo seguinte foi a aplicação do método ELECTRE TRI na classificação dos equipamentos. Para aplicação do método foi utilizado o software ELECTRE TRI 2.0a, disponível na Lamsade (*Paris-Dauphine University, Paris, France*)¹. Os resultados da aplicação estão disponíveis no quadro 11.

¹ Maiores detalhes sobre o software podem ser consultados no apêndice D

Quadro 11 – Classificação ELECTRE TRI

Classes	Criticidade	Atribuição Pessimista	Atribuição Otimista
Classe A	Altíssima	a ₁ ; a ₃₂ ; a ₄₂ ; a ₄₄ ; a ₅₉ ; a ₆₁ ; a ₆₇ ; a ₆₈ ; a ₇₀ ; a ₇₂ ; a ₈₀ ; a ₁₀₅ ; a ₁₁₀ ; a ₁₂₉	a ₀₁ ; a ₀₄ ; a ₁₄ ; a ₃₂ ; a ₃₇ ; a ₄₂ ; a ₄₄ ; a ₅₉ ; a ₆₁ ; a ₆₃ ; a ₆₇ ; a ₆₈ ; a ₇₀ ; a ₇₂ ; a ₈₀ ; a ₁₀₅ ; a ₁₁₀ ; a ₁₂₉ ; a ₁₃₂ ; a ₁₃₆ ; a ₁₃₈ ; a ₁₄₂
Classe B	Alta	a ₀₃ ; a ₀₄ ; a ₀₆ ; a ₁₅ ; a ₁₈ ; a ₂₅ ; a ₂₆ ; a ₂₇ ; a ₂₈ ; a ₃₆ ; a ₃₇ ; a ₄₆ ; a ₆₀ ; a ₆₉ ; a ₇₃ ; a ₇₅ ; a ₈₂ ; a ₈₃ ; a ₈₅ ; a ₉₀ ; a ₉₁ ; a ₉₆ ; a ₉₇ ; a ₁₀₆ ; a ₁₀₇ ; a ₁₀₈ ; a ₁₁₁ ; a ₁₁₆ ; a ₁₂₀ ; a ₁₂₁ ; a ₁₂₇ ; a ₁₃₁ ; a ₁₃₉ ; a ₁₅₃	a ₀₂ ; a ₀₃ ; a ₀₆ ; a ₀₇ ; a ₁₀ ; a ₁₁ ; a ₁₅ ; a ₁₈ ; a ₂₅ ; a ₂₆ ; a ₂₇ ; a ₂₈ ; a ₃₆ ; a ₄₅ ; a ₄₆ ; a ₅₃ ; a ₅₈ ; a ₆₀ ; a ₆₉ ; a ₇₃ ; a ₇₅ ; a ₈₂ ; a ₈₃ ; a ₈₅ ; a ₉₀ ; a ₉₁ ; a ₉₃ ; a ₉₄ ; a ₉₆ ; a ₉₇ ; a ₁₀₆ ; a ₁₀₇ ; a ₁₀₈ ; a ₁₁₁ ; a ₁₁₆ ; a ₁₂₀ ; a ₁₂₁ ; a ₁₂₇ ; a ₁₃₀ ; a ₁₃₁ ; a ₁₃₉ ; a ₁₅₃
Classe C	Média	a ₀₂ ; a ₀₅ ; a ₀₇ ; a ₀₈ ; a ₁₀ ; a ₁₁ ; a ₁₂ ; a ₁₃ ; a ₁₄ ; a ₁₆ ; a ₁₇ ; a ₂₁ ; a ₂₂ ; a ₂₄ ; a ₂₉ ; a ₄₀ ; a ₄₅ ; a ₄₉ ; a ₅₂ ; a ₅₃ ; a ₅₄ ; a ₅₅ ; a ₅₇ ; a ₅₈ ; a ₆₃ ; a ₆₅ ; a ₇₁ ; a ₇₇ ; a ₇₉ ; a ₈₇ ; a ₉₃ ; a ₉₄ ; a ₉₈ ; a ₉₉ ; a ₁₀₂ ; a ₁₀₉ ; a ₁₁₄ ; a ₁₁₇ ; a ₁₁₈ ; a ₁₂₂ ; a ₁₂₃ ; a ₁₂₅ ; a ₁₂₈ ; a ₁₃₂ ; a ₁₃₃ ; a ₁₃₄ ; a ₁₃₅ ; a ₁₃₆ ; a ₁₃₈ ; a ₁₄₁ ; a ₁₄₂ ; a ₁₄₃ ; a ₁₄₄ ; a ₁₄₅ ; a ₁₄₆ ; a ₁₅₀ ; a ₁₅₁	a ₀₅ ; a ₀₈ ; a ₁₂ ; a ₁₃ ; a ₁₆ ; a ₁₇ ; a ₁₉ ; a ₂₁ ; a ₂₂ ; a ₂₃ ; a ₂₄ ; a ₂₉ ; a ₃₀ ; a ₃₄ ; a ₃₈ ; a ₃₉ ; a ₄₀ ; a ₄₃ ; a ₄₇ ; a ₄₉ ; a ₅₂ ; a ₅₄ ; a ₅₅ ; a ₅₇ ; a ₆₂ ; a ₆₄ ; a ₆₅ ; a ₇₁ ; a ₇₄ ; a ₇₆ ; a ₇₇ ; a ₇₉ ; a ₈₁ ; a ₈₇ ; a ₉₈ ; a ₉₉ ; a ₁₀₁ ; a ₁₀₂ ; a ₁₀₉ ; a ₁₁₂ ; a ₁₁₄ ; a ₁₁₅ ; a ₁₁₇ ; a ₁₁₈ ; a ₁₉₉ ; a ₁₂₂ ; a ₁₂₃ ; a ₁₂₅ ; a ₁₂₈ ; a ₁₃₃ ; a ₁₃₄ ; a ₁₃₅ ; a ₁₃₇ ; a ₁₄₀ ; a ₁₄₁ ; a ₁₄₃ ; a ₁₄₄ ; a ₁₄₅ ; a ₁₄₆ ; a ₁₄₇ ; a ₁₅₀ ; a ₁₅₁
Classe D	Baixa	a ₀₉ ; a ₁₉ ; a ₂₀ ; a ₂₃ ; a ₃₀ ; a ₃₁ ; a ₃₃ ; a ₃₄ ; a ₃₅ ; a ₃₈ ; a ₃₉ ; a ₄₁ ; a ₄₃ ; a ₄₇ ; a ₄₈ ; a ₅₀ ; a ₅₁ ; a ₅₆ ; a ₆₂ ; a ₆₄ ; a ₆₆ ; a ₇₄ ; a ₇₆ ; a ₇₈ ; a ₈₁ ; a ₈₄ ; a ₈₆ ; a ₈₈ ; a ₈₉ ; a ₉₂ ; a ₉₅ ; a ₁₀₀ ; a ₁₀₁ ; a ₁₀₄ ; a ₁₁₂ ; a ₁₂₃ ; a ₁₁₅ ; a ₁₁₉ ; a ₁₂₄ ; a ₁₂₆ ; a ₁₃₀ ; a ₁₃₇ ; a ₁₄₀ ; a ₁₄₇ ; a ₁₄₈ ; a ₁₄₉ ; a ₁₅₂	a ₀₉ ; a ₂₀ ; a ₃₁ ; a ₃₃ ; a ₃₅ ; a ₄₁ ; a ₄₈ ; a ₅₀ ; a ₅₁ ; a ₅₆ ; a ₆₆ ; a ₇₈ ; a ₈₄ ; a ₈₆ ; a ₈₈ ; a ₈₉ ; a ₉₂ ; a ₉₅ ; a ₁₀₀ ; a ₁₀₃ ; a ₁₀₄ ; a ₁₁₃ ; a ₁₂₄ ; a ₁₂₆ ; a ₁₄₈ ; a ₁₄₉ ; a ₁₅₂

Fonte: Autor (2015)

O ELECTRE TRI emprega duas formas de avaliação, o pessimista, também chamada de regra conjuntiva, e o otimista, também chamada de regra disjuntiva. No procedimento pessimista a alternativa deve ser atribuída a categoria de maior nível na qual a alternativa ai sobreclassifica o valor de referência da categoria inferior. No procedimento otimista ocorre o contrário, a alternativa é atribuída a categoria de menor nível onde qual o valor de referência da categoria superior sobreclassifica a alternativa.

Desta forma o procedimento otimista tende a alocar as alternativas em classes mais altas, sendo de uma exigência menor. Já o procedimento pessimista tende a classificar as alternativas em categorias inferiores, por trabalhar com maior exigência.

No quadro 12 é apresentado um resumo das comparações entre as alternativas, com as situações de incomparabilidade, indiferença e superação. Na tabela 06 é apresentado a estatística dos resultados da aplicação na forma de percentual de cada classe.

Tabela 6 – Estatística dos resultados

Categoria	Criticidade	Procedimento	
		Pessimista	Otimista
Classe A	Altíssima	9% (14 de 153)	14% (22 de 153)
Classe B	Alta	22% (34 de 153)	27% (42 de 153)
Classe C	Média	37% (57 de 153)	41% (62 de 153)
Classe D	Baixa	31% (48 de 153)	18% (27 de 153)

Fonte: Autor (2015)

4.6.1 Considerações sobre aplicação do ELECTRE TRI

Mosseau e Slowinski (2002) ressaltam as diferenças entre os procedimentos otimista e pessimista, onde o procedimento otimista possui uma tendência de classificar as alternativas em categorias superiores, por possuir um grau de exigência menor. Já o pessimista tende a classificar as alternativas em categorias inferiores por possuir uma grau de exigência maior. Quando ocorrem divergências entre as classificações, o decisor pode adotar uma delas em razão do seu perfil e objetivo da análise.

Como o objetivo da aplicação do ELECTRE no trabalho é a classificação dos equipamentos críticos, a adoção de um perfil mais exigente, poderia resultar em uma classificação de equipamentos críticos em classes menos importantes para manutenção. Por outro lado, a adoção de um perfil com menor exigência, poderia resultar em uma concentração elevada de equipamentos nas classes mais altas.

Na aplicação realizada as duas classificações foram analisadas pelos decisores, já que foram poucas as diferenças apresentadas em cada classificação. Os dois procedimentos apresentaram uma distribuição uniforme dos equipamentos entre as categorias, com um número reduzido de alternativas variando entre as classes. Contudo, o procedimento pessimista foi adotado para análise, pois foram poucas as alternativas que apresentaram incomparabilidade e seu resultado foi mais fiel ao perfil de referência estabelecido pelos decisores.

Quadro 12 – Comparações do procedimento de classificação

	b3	b2	b1		b3	b2	b1		b3	b2	b1		b3	b2	b1
a ₁	>	>	>	a ₃₉	R	<	<	a ₇₇	>	<	<	a ₁₁₅	R	<	<
a ₂	>	R	<	a ₄₀	>	<	<	a ₇₈	<	<	<	a ₁₁₆	>	>	<
a ₃	>	I	<	a ₄₁	<	<	<	a ₇₉	>	<	<	a ₁₁₇	>	<	<
a ₄	>	>	R	a ₄₂	>	>	>	a ₈₀	>	>	>	a ₁₁₈	>	<	<
a ₅	>	<	<	a ₄₃	R	<	<	a ₈₁	R	<	<	a ₁₁₉	R	<	<
a ₆	>	I	<	a ₄₄	>	>	>	a ₈₂	>	I	<	a ₁₂₀	>	I	<
a ₇	>	R	<	a ₄₅	>	R	<	a ₈₃	>	>	<	a ₁₂₁	>	I	<
a ₈	>	<	<	a ₄₆	>	>	<	a ₈₄	<	<	<	a ₁₂₂	>	<	<
a ₉	<	<	<	a ₄₇	R	<	<	a ₈₅	>	I	<	a ₁₂₃	>	<	<
a ₁₀	>	R	<	a ₄₈	<	<	<	a ₈₆	<	<	<	a ₁₂₄	<	<	<
a ₁₁	>	R	<	a ₄₉	>	<	<	a ₈₇	>	<	<	a ₁₂₅	>	<	<
a ₁₂	>	<	<	a ₅₀	<	<	<	a ₈₈	<	<	<	a ₁₂₆	<	<	<
a ₁₃	>	<	<	a ₅₁	<	<	<	a ₈₉	<	<	<	a ₁₂₇	>	I	<
a ₁₄	>	R	R	a ₅₂	>	<	<	a ₉₀	>	I	<	a ₁₂₈	>	<	<
a ₁₅	>	>	<	a ₅₃	>	R	<	a ₉₁	>	I	<	a ₁₂₉	>	>	>
a ₁₆	>	<	<	a ₅₄	>	<	<	a ₉₂	<	<	<	a ₁₃₀	R	R	<
a ₁₇	>	<	<	a ₅₅	>	<	<	a ₉₃	>	R	<	a ₁₃₁	>	I	<
a ₁₈	>	I	<	a ₅₆	<	<	<	a ₉₄	>	R	<	a ₁₃₂	>	R	R
a ₁₉	R	<	<	a ₅₇	>	<	<	a ₉₅	<	<	<	a ₁₃₃	>	<	<
a ₂₀	<	<	<	a ₅₈	>	R	<	a ₉₆	>	I	<	a ₁₃₄	>	<	<
a ₂₁	I	<	<	a ₅₉	>	>	>	a ₉₇	>	I	<	a ₁₃₅	>	<	<
a ₂₂	>	<	<	a ₆₀	>	>	<	a ₉₈	>	<	<	a ₁₃₆	>	R	R
a ₂₃	R	<	<	a ₆₁	>	>	>	a ₉₉	>	<	<	a ₁₃₇	R	<	<
a ₂₄	>	<	<	a ₆₂	R	<	<	a ₁₀₀	<	<	<	a ₁₃₈	>	R	R
a ₂₅	>	I	<	a ₆₃	>	R	R	a ₁₀₁	R	<	<	a ₁₃₉	>	I	<
a ₂₆	>	I	<	a ₆₄	R	<	<	a ₁₀₂	>	<	<	a ₁₄₀	R	<	<
a ₂₇	>	I	<	a ₆₅	>	<	<	a ₁₀₃	<	<	<	a ₁₄₁	>	<	<
a ₂₈	>	>	<	a ₆₆	<	<	<	a ₁₀₄	<	<	<	a ₁₄₂	>	R	R
a ₂₉	>	<	<	a ₆₇	>	>	>	a ₁₀₅	>	>	>	a ₁₄₃	>	<	<
a ₃₀	R	<	<	a ₆₈	>	>	>	a ₁₀₆	>	>	<	a ₁₄₄	>	<	<
a ₃₁	<	<	<	a ₆₉	>	I	<	a ₁₀₇	>	>	<	a ₁₄₅	>	<	<
a ₃₂	>	>	>	a ₇₀	>	>	>	a ₁₀₈	>	>	<	a ₁₄₆	>	<	<
a ₃₃	<	<	<	a ₇₁	>	<	<	a ₁₀₉	>	<	<	a ₁₄₇	R	<	<
a ₃₄	R	<	<	a ₇₂	>	>	>	a ₁₁₀	>	>	>	a ₁₄₈	<	<	<
a ₃₅	<	<	<	a ₇₃	>	I	<	a ₁₁₁	>	>	<	a ₁₄₉	<	<	<
a ₃₆	>	I	<	a ₇₄	R	<	<	a ₁₁₂	R	<	<	a ₁₅₀	>	<	<
a ₃₇	>	>	R	a ₇₅	>	I	<	a ₁₁₃	<	<	<	a ₁₅₁	>	<	<
a ₃₈	R	<	<	a ₇₆	R	<	<	a ₁₁₄	>	<	<	a ₁₅₂	<	<	<
Legenda: > = preferência / < = não-preferência												a ₁₅₃	>	I	<
R = incomparabilidade / I = indiferença															

Fonte: Autor (2015)

A aplicação do ELECTRE TRI na classificação dos equipamentos críticos do sistema de tensionamento apresenta 31% dos equipamentos analisados classificados como críticos, dos quais 9% apresentam uma criticidade altíssima, exigindo uma

atuação imediata da manutenção. Os equipamentos alocados na classe altíssima possuíam valores extremos nos critérios g_1 (risco a segurança), g_2 (indisponibilidade) e g_3 (qualidade), definidos como prioridade pelos decisores.

As alternativas presentes na classe alta, apresentaram como principal característica um desempenho maior nos critérios g_2 (indisponibilidade) e g_7 (custos de manutenção), acompanhada de um desempenho intermediário nos critérios g_1 e g_3 . Quando a alternativa apresentou um desempenho menor sobre g_2 , o critério g_6 (MTBF) foi preponderante na sua classificação (alternativa a_{91}).

A classe C (criticidade média) concentrou as alternativas com desempenho inferior nos critérios de segurança e qualidade, e com impacto significativo na indisponibilidade do equipamento ou seu MBTF. As alternativas alocadas na classe de menor criticidade, em sua grande maioria, apresentaram impactos insignificantes nos critérios considerados como prioridade pelos decisores.

O resultado da aplicação permite traçar um planejamento de manutenção focado no controle e planejamento de ações sistêmicas com resultado a longo prazo, visto que grande parte das alternativas possuem criticidade média ou baixa. Para os equipamentos avaliados com um criticidade maior, a estratégia é a ação imediata nos equipamentos altamente críticos (9%), com ações de melhorias focadas voltadas a reduzir o seu impacto de sua falha em aspectos como segurança e qualidade do produto. Já para os equipamentos da classe alta (22%), a atuação da manutenção deve ser priorizada em razão da ordenação dos equipamentos, com uma mescla de ações imediatas e sistêmicas.

4.7 APLICAÇÃO DO PROMETHEE II

Após a classificação das alternativas em classes, o próximo passo é a ordenação das alternativas presentes em cada classe através do PROMETHEE II. Para aplicação do método foi utilizado o software “*Visual PROMETHEE*”².

A ordenação dos equipamentos é importante no planejamento da manutenção, para informar quais equipamentos deverão ser priorizados em cada

² Maiores informações sobre o software podem ser consultadas no Apêndice E

classe, visto que algumas das classe apresentaram um número elevado de alternativas. No trabalho foram ordenados os equipamentos presentes na Classe B, os quais apresentam criticidade alta. Os decisores não escolheram a “Classe A” por entender que a atuação de manutenção deveria ser imediata para todo o grupo de equipamentos.

Para construir a matriz de avaliação das alternativas, foram utilizados os dados já avaliados e tabulados pelos decisores, no entanto, para a aplicação do PROMETHEE não foi utilizado o procedimento de normalização do desempenho através da média dos valores para os critérios de indisponibilidade, MTBF e custo da manutenção.

Os decisores entenderam que a utilização deste método poderia interferir na ordenação das alternativas com valores superiores à média. Além disso, como a ordenação ocorrerá nas classes previamente já classificadas através do ELECTRE TRI, os desempenhos das alternativas em determinados critérios tendem a ficar aproximados, onde qualquer diferença entre as alternativas será fundamental na avaliação para ordená-las. A matriz de avaliação é apresentada na tabela 07.

Foram mantidos os mesmos critérios e pesos utilizados na classificação das alternativas, contudo, foram necessárias algumas alterações na modelagem de preferência devido a forma como os dados foram tabulados para este fase. O quadro 13 apresenta os critérios e um resumo dos parâmetros utilizados no PROMETHEE II.

A função *V-Shape* foi escolhida para os critérios g_1 , g_3 e g_4 em razão das características dos dados analisados na classe. Neste tipo de função, quando a diferença entre o desempenho de duas alternativas (a,b) é menor que (p) , a preferência pela alternativa (a) aumenta de forma linear com base na diferença $d(a,b)$, nos casos em que a diferença é maior que (p) ocorre preferência estrita pela alternativa (a) .

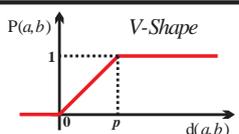
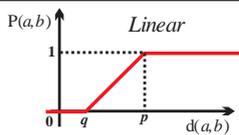
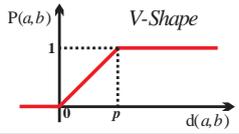
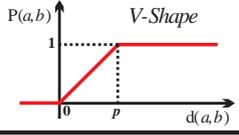
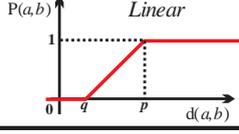
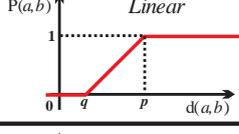
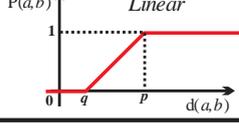
Como as alternativas já haviam sido previamente classificadas, elas apresentavam valores similares nesses critérios, de forma que uma preferência estrita seria justificável somente em razão de uma grande diferença entre elas. Para os critérios restantes foi escolhida a função *Linear*, assim quando a diferença de desempenhos entre duas alternativas (a,b) for inferior a q , assume-se não haver preferência entre elas, caso a diferença esteja entre q e p , assume-se uma preferência relativa a alternativa de maior desempenho, e quando a diferença é superior a p ocorre uma preferência estrita.

Tabela 7 – Matriz de avaliação para aplicação do PROMETHEE II

Alternativa		g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Drive motor	a ₃	60	311,64	60	33,33	3,29	10107,00	5850,83
Cabos de alimentação	a ₄	100	187,62	80	33,33	2,35	33690,00	1080,89
Conversor AC DC	a ₆	60	311,64	60	33,33	3,29	10668,50	4166,33
Articulações	a ₁₅	80	150,10	60	33,33	1,88	24706,00	1212,84
Válvula Proporcional	a ₁₈	60	174,90	60	66,66	2,35	10668,50	743,99
Modulo Link Desbobinador de Papel	a ₂₅	60	187,62	60	33,33	2,35	4716,60	1600,28
Modulo Link Sala elétrica de Papel	a ₂₆	60	187,62	60	33,33	2,35	4716,60	1600,28
Rede Profibus / CPU S5	a ₂₇	60	187,62	60	33,33	2,35	5053,50	1993,33
Fibras ópticas	a ₂₈	80	225,14	60	33,33	2,82	1684,50	758,03
Bumpers	a ₃₆	60	115,23	60	33,33	1,61	4612,86	1488,20
Facas	a ₃₇	100	115,23	80	33,33	1,61	3294,90	480,51
Cilindro Dry Roller	a ₄₆	80	455,70	60	33,33	5,38	35145,60	5052,18
Dive DC	a ₆₀	60	204,33	80	33,33	3,11	20318,55	2833,61
Transmissão da pinça	a ₆₉	60	136,22	60	33,33	2,08	18506,34	1542,20
Drive	a ₇₃	60	190,74	60	33,33	3,11	19020,41	5325,71
Link	a ₇₅	60	158,95	60	33,33	2,60	3598,46	1465,09
Mancais/ buchas / rolamentos	a ₈₂	60	189,92	60	33,33	2,60	15421,95	1362,27
Base de fixação	a ₈₃	80	227,91	60	33,33	3,11	22618,86	488,36
Célula de carga	a ₈₅	60	189,92	60	33,33	2,42	4318,15	2698,84
Mancais/ Rolamentos / Buchas	a ₉₀	60	84,98	60	33,33	1,16	3598,46	544,91
Cilindro NIP	a ₉₁	60	70,82	60	33,33	0,97	1130,94	8800,79
Motor AC	a ₉₆	60	135,23	60	33,33	1,93	9767,24	6806,22
Drive AC	a ₉₇	60	202,84	60	33,33	2,90	19020,41	5325,71
Redutor	a ₁₀₆	80	441,21	60	33,33	5,32	21615,00	3664,73
Correia / Polia	a ₁₀₇	80	354,82	60	33,33	3,87	14737,50	540,38
Mancais / Rolamento	a ₁₀₈	80	399,17	60	33,33	4,35	14737,50	2623,28
Bailarino	a ₁₁₁	60	136,22	80	33,33	1,93	32422,50	1572,00
Atuador Pneumático	a ₁₁₆	80	136,22	60	33,33	1,93	2238,50	508,75
motor AC	a ₁₂₀	60	136,22	60	33,33	1,93	4070,00	1424,50
Drive	a ₁₂₁	60	204,33	60	33,33	2,90	18823,75	2187,63
Guias Eixos	a ₁₂₇	60	193,46	60	33,33	2,60	22385,00	3612,13
Articulação/ buchas	a ₁₃₁	60	193,46	60	33,33	2,60	3561,25	724,97
Correias Sincronizadas	a ₁₃₉	60	116,08	60	33,33	1,64	15262,50	1907,81
Rede Profibus/ cabos e terminações	a ₁₅₃	60	168,33	60	33,33	2,38	3561,25	653,74

Fonte: Autor (2015)

Quadro 13 – Modelagem de preferências do PROMETHEE II

Crítérios	Função de Preferência	Limites
Risco à segurança - RS (g_1) Unidade: % Peso: 2,91		Limite de indiferença (q): não se aplica Limite de preferência (p): 40%
Indisponibilidade da Produção - In (g_2) Unidade: Minutos Peso: 1,82		Limite de indiferença (q): 30 min. Limite de preferência (p): 60 min.
Impacto na Qualidade - QL (g_3) Unidade: % Peso: 2,36		Limite de indiferença (q): não se aplica Limite de preferência (p): 30%
Riscos Ambientais - RA (g_4) Unidade: % Peso: 0,55		Limite de indiferença (q): não se aplica Limite de preferência (p): 30%
Tempo Médio de Reparo - MTTR (g_5) Unidade: Horas Peso: 0,73		Limite de indiferença (q): 0,5h Limite de preferência (p): 1h
Tempo Médio entre Falhas - MTBF (g_6) Unidade: Horas Peso: 1,09		Limite de indiferença (q): 7000h Limite de preferência (p): 14000h
Custo da Manutenção - CM (g_7) Unidade: R\$ Peso: 0,55		Limite de indiferença (q): R\$ 1200,00 Limite de preferência (p): R\$ 3500,00

Fonte: Autor (2015)

Como os dados dos critérios g_2 , g_5 , g_6 e g_7 foram inseridos de forma direta, sem o procedimento de normalização da etapa anterior, os decisores definiram novos limites de preferência e indiferença para cada critério, baseados na natureza da classificação e do regime do processo.

Concluída a modelagem de preferência, foi aplicado o método PROMETHEE II através do software “*Visual PROMETHEE*”. A tabela 08 apresenta o resultado da ordenação, juntamente com os fluxos positivos, negativos e líquidos para cada alternativa.

Analisando cada critério de forma isolada o decisor poderia optar por várias alternativas distintas, como por exemplo ao analisar o critério de indisponibilidade (g_2) a alternativa a_{46} seria dada como mais crítica, visto que o tempo em que o processo

está sem produzir é crítico na manutenção. Porém essa alternativa foi alocada apenas como 4ª no ranking, devido ao desempenho inferior em outros critérios.

Tabela 8 – Ordenação PROMETHEE II

Ranking	Alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1ª	<i>a</i> ₁₀₆	0,2888	0,3768	0,088
2ª	<i>a</i> ₄	0,2814	0,4459	0,1645
3ª	<i>a</i> ₁₀₈	0,2814	0,3574	0,076
4ª	<i>a</i> ₄₆	0,2599	0,3902	0,1303
5ª	<i>a</i> ₃₇	0,2572	0,442	0,1848
6ª	<i>a</i> ₁₀₇	0,2438	0,3356	0,0918
7ª	<i>a</i> ₂₈	0,178	0,2648	0,0868
8ª	<i>a</i> ₃	0,1608	0,263	0,1022
9ª	<i>a</i> ₆	0,1414	0,2466	0,1052
10ª	<i>a</i> ₆₀	0,1014	0,2555	0,1541
11ª	<i>a</i> ₈₃	0,0879	0,2327	0,1448
12ª	<i>a</i> ₁₁₆	-0,0057	0,1709	0,1766
13ª	<i>a</i> ₁₃₁	-0,015	0,119	0,134
14ª	<i>a</i> ₈₅	-0,0178	0,1132	0,131
15ª	<i>a</i> ₉₇	-0,0296	0,1365	0,1661
16ª	<i>a</i> ₇₃	-0,033	0,1343	0,1673
17ª	<i>a</i> ₂₇	-0,0345	0,1023	0,1367
18ª	<i>a</i> ₂₅	-0,0362	0,102	0,1382
18ª	<i>a</i> ₂₆	-0,0362	0,102	0,1382
20ª	<i>a</i> ₁₈	-0,0465	0,1022	0,1487
21ª	<i>a</i> ₇₅	-0,0697	0,0813	0,1509
22ª	<i>a</i> ₁₅₃	-0,07	0,0817	0,1517
23ª	<i>a</i> ₁₂₁	-0,074	0,0997	0,1738
24ª	<i>a</i> ₁₂₇	-0,0824	0,0967	0,1791
25ª	<i>a</i> ₁₅	-0,0857	0,1249	0,2106
26ª	<i>a</i> ₈₂	-0,0868	0,0773	0,1641
27ª	<i>a</i> ₉₆	-0,1216	0,0856	0,2072
28ª	<i>a</i> ₁₁₁	-0,133	0,1558	0,2888
29ª	<i>a</i> ₁₂₀	-0,1563	0,0598	0,216
30ª	<i>a</i> ₉₁	-0,1951	0,1104	0,3055
31ª	<i>a</i> ₃₆	-0,2024	0,0494	0,2517
32ª	<i>a</i> ₆₉	-0,2357	0,0233	0,259
33ª	<i>a</i> ₉₀	-0,2522	0,0481	0,3003
34ª	<i>a</i> ₁₃₉	-0,2627	0,0161	0,2788

Fonte: Autor (2015)

4.7.1 Considerações sobre aplicação do PROMETHEE II

Ao observarmos os critérios “risco a segurança” (g_1) e “impacto na qualidade” (g_3), apesar de seus pesos, seu impacto foi menor no resultado, quando comparado com a etapa anterior de classificação, isto se deve principalmente as alternativas já estarem alocadas em classes críticas perante estes critérios. Somente quando a diferença de desempenho entre as alternativas foi maior que o limite de preferência (p) estabelecido pelo decisor os critérios foram determinantes na ordenação, caso das alternativas a_4 e a_{37} . Outro critério que apresentou impacto reduzido na ordenação foi “riscos ambientais” (g_4), em razão de todas as alternativas apresentarem desempenhos iguais na avaliação deste.

Ao se observar o critério de “indisponibilidade” (g_2), verifica-se uma tendência de relação do ranking final com este critério, onde a posição da alternativa sobe quando o seu desempenho é maior neste critério. Como a indisponibilidade é relacionada ao “Tempo Médio de Reparo” (g_5), este critério também apresentou esta tendência.

Este comportamento na ordenação se deve principalmente pela similaridade de desempenho nos critérios (g_1 e g_3), de maior peso, onde qualquer mudança na indisponibilidade é refletida no resultado final. Observamos que nos casos em que o desempenho da alternativa superou os limites de preferência estabelecidos pelo decisor para g_1 e g_3 , a indisponibilidade não impactou de forma decisiva na análise, como nos casos das alternativas a_2 , a_5 , a_{10} e a_{12} .

Os critérios “Tempo Médio entre Falhas” (g_6) e “Custo da Manutenção” (g_7), quando analisados de forma individual apresentam resultados distantes da ordenação, por apresentarem pesos menores, contudo percebe-se o seu impacto na ordenação quando o desempenho das alternativas foi similar entre os critérios de maior peso, como nos casos das alternativas a_3 , a_6 , a_{25} , a_{26} e a_{27} .

Com base nos fluxos líquido da tabela 08 é apresentado o ordenamento resultante através da figura 22.

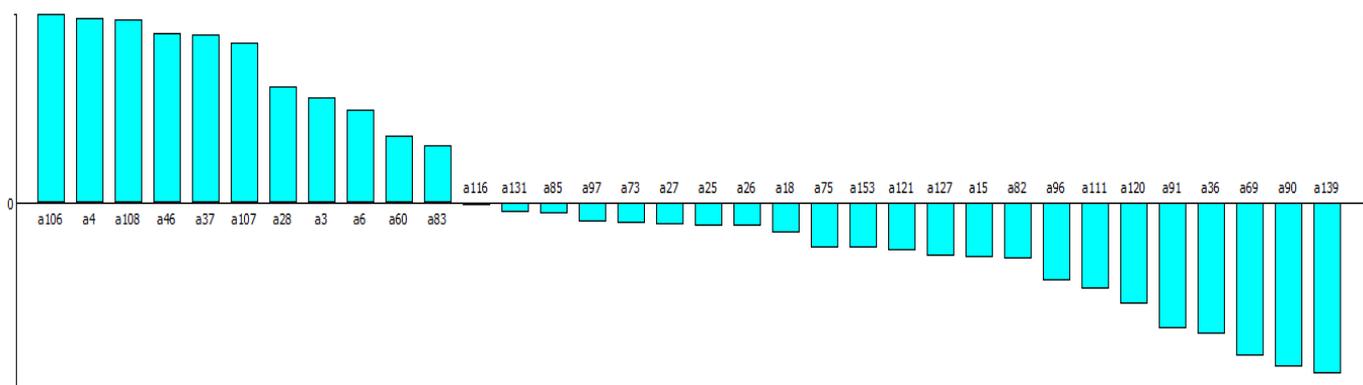


Figura 22 – Ordenamento das alternativas utilizando o PROMETHE II

Fonte: Autor (2015)

Vale ressaltar que o método multicritério é aconselhado quando há vários critérios e uma diversidade de alternativas a serem consideradas, pois apresenta uma solução equilibrada na interação entre os critérios e alternativas. Contudo, quando se utiliza um método multicritério os resultados obtidos podem ser influenciados por fatores como: preferências do decisor, critérios e pesos.

4.7.2 Análise de Sensibilidade

Com objetivo de verificar a influência do decisor no resultado, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo, através de uma variação de ($\pm 15\%$) em cada critério e seu impacto na ordenação das alternativas. O procedimento é realizado pelo software e consiste em aplicar uma variação no peso de um critério, a qual irá inferir em uma redistribuição dos pesos dos demais critérios realizada de forma proporcional aos valores originais do modelo. A tabela 09 apresenta os valores utilizados na análise e a variação de cada critério e a tabela 10 apresenta a variação na ordenação com a alteração do peso de cada critério.

Com base na tabela verifica-se que conforme a variação em cada critério, poucas alternativas apresentaram mudanças em sua ordenação, onde na sua grande maioria foram alterações de apenas 01 posição no ranking. Nas alternativas que apresentaram variações maiores (superiores a 3 posições), observa-se um desempenho superior à média do grupo para o critério que estava sendo analisado. Um exemplo é a alternativa a_{118} , que desceu 7 posições quando foi diminuído o peso do critério g_1 , onde a mesma apresenta um desempenho superior.

Outro ponto observado foi que a maior quantidade de alterações ocorreram na variação do critério “MTBF” (g_6) e em dois casos isolados, onde se diminui o peso do critério “Risco a segurança” (g_1) e quando o peso do critério “indisponibilidade” (g_2) foi aumentado. Ao analisarmos o critério g_6 , percebemos que este é um dos que apresenta maiores diferenças nos desempenhos de cada alternativa, aliado a um peso intermediário estabelecido pelos decisores. No caso das variações apresentados pelos critérios g_1 e g_2 , estas ocorreram nas alternativas que apresentavam um desempenho superior aos limites de preferência estabelecidos pelos decisores para os critérios.

Nos demais critérios as poucas variações na ordenação resultaram de pequenas diferenças de desempenho apresentadas por cada alternativa em determinado critério. Apenas o critério “impactos ambientais” (g_4) não apresentou variações na ordenação devido ao desempenho de todas as alternativas apresentarem um desempenho comum no critério.

Assim, o modelo se comportou de forma consistente, visto que não ocorreram mudanças abruptas na posição das alternativas. Além disso, em todas as situações simuladas sempre foram mantidas o grupo de alternativas nas primeiras e últimas posições, o que representa uma diferença mínima comparada a ordenação original.

No apêndice B são apresentados os fluxos resultantes, a representação visual da ordenação na variação de cada critério e a variação completa dos valores utilizados na análise de sensibilidade.

Tabela 9 – Variação dos pesos utilizada na análise de sensibilidade

Critérios	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
Pesos Originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑%15	3,3	2,1	2,8	0,6	0,8	1,3	0,7
↓%15	2,4	1,5	2	0,4	0,6	0,9	0,5

Fonte: Autor (2015)

Tabela 10 – Variação apresentada na análise de sensibilidade

Critérios		g1		g2		g3		g4		g5		g6		g7	
Ranking	Alternativa	↑15%	↓15%	↑15%	↓15%	↑15%	↓15%	↑15%	↓15%	↑15%	↓15%	↑15%	↓15%	↑15%	↓15%
1	a106	a4	a106	a106	a37	a4	a106	a106	a106	a106	a4	a106	a4	a106	a106
2	a4	a106	a108	a108	a4	a37	a108	a4	a4	a108	a106	a108	a106	a108	a4
3	a108	a37	a46	a46	a106	a106	a46	a108	a108	a4	a108	a37	a108	a4	a108
4	a46	a108	a4	a4	a108	a108	a4	a46	a46	a46	a37	a4	a46	a46	a37
5	a37	a46	a107	a107	a46	a46	a107	a37	a37	a37	a46	a107	a37	a37	a46
6	a107	a107	a37	a37	a107	a107	a37	a107	a107	a107	a107	a46	a107	a107	a107
7	a28	a28	a3	a28											
8	a3	a3	a28	a3											
9	a6	a6	a6	a6	a6	a60	a6								
10	a60	a83	a60	a60	a60	a6	a83	a60							
11	a83	a60	a83	a83	a83	a83	a60	a83							
12	a116	a116	a131	a131	a116										
13	a131	a131	a85	a85	a131	a97	a85	a131							
14	a85	a85	a97	a97	a85	a131	a97	a85							
15	a97	a97	a73	a116	a97	a27	a73	a131	a97						
16	a73	a73	a27	a73	a27	a25	a85	a73	a27						
17	a27	a27	a25	a27	a25	a26	a27	a27	a25						
18	a25	a25	a26	a25	a26	a97	a25	a25	a26						
18	a26	a26	a116	a26	a73	a73	a26	a26	a73						
20	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18	a18
21	a75	a15	a75	a121	a75	a75	a75	a75	a75	a75	a153	a75	a121	a75	a153
22	a153	a75	a153	a75	a153	a127	a153	a75							
23	a121	a153	a121	a75	a15	a121	a15	a121	a121						
24	a127	a121	a127	a127	a121	a127	a127	a127	a127	a127	a15	a82	a75	a127	a127
25	a15	a127	a82	a82	a127	a15	a15	a15	a15	a82	a127	a127	a153	a15	a15
26	a82	a82	a15	a15	a82	a82	a82	a82	a82	a15	a82	a15	a82	a82	a82
27	a96	a96	a96	a96	a96	a111	a96	a96	a96	a96	a96	a96	a111	a96	a96
28	a111	a111	a111	a111	a111	a96	a120	a111	a111	a111	a111	a120	a96	a111	a111
29	a120	a120	a120	a120	a120	a120	a111	a120	a120	a120	a120	a111	a120	a120	a120
30	a91	a91	a91	a36	a91										
31	a36	a36	a36	a91	a36										
32	a69	a69	a69	a69	a69	a69	a69	a69	a69	a69	a69	a90	a69	a69	a69
33	a90	a90	a90	a90	a90	a90	a90	a90	a90	a90	a90	a69	a139	a90	a90
34	a139	a139	a139	a139	a139	a139	a139	a139	a139	a139	a139	a139	a90	a139	a139

Fonte: Autor (2015)

4.8 ANÁLISE DA APLICAÇÃO

Ao final do procedimento de classificação e ordenação propostos pelo modelo, os decisores realizaram uma análise da aplicação, comparando o modelo multicritério proposto com dois métodos de classificação tradicionais de equipamentos críticos: A classificação ABC e o Número de Risco (RPN).

Para a classificação ABC foram utilizados os mesmos critérios avaliados no modelo, através do fluxograma apresentado na figura 21.

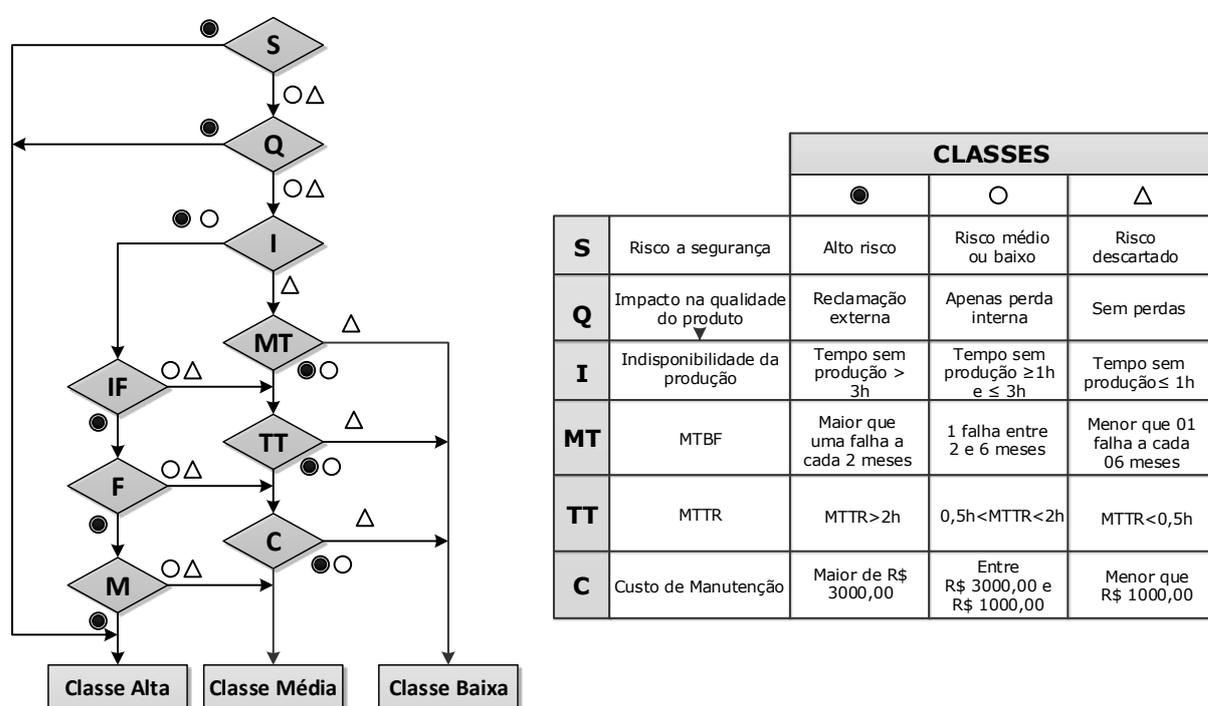


Figura 23 – Classificação ABC

Fonte: Autor (2015)

A principal diferença entre a classificação ABC e o método proposto está no fato da utilização do diagrama decisional, onde uma alternativa que apresenta um alto risco a segurança ou impacto na qualidade, é classificada com criticidade alta, independente dos outros critérios.

Assim, foram percebidas várias discrepâncias entre a classificação do modelo e o método ABC. Um exemplo é a alternativa a_{130} , no modelo ela foi alocada na classe de baixa criticidade, já na classificação ABC ela foi classificada entre as mais críticas,

por apresentar um valor elevado no critério risco a segurança, contudo os demais critérios apresentam um desempenho baixo.

Outro exemplo é a alternativa a_{34} , alocada na classe de baixa criticidade pela classificação ABC, esta alternativa apresenta valores elevados em critérios como indisponibilidade e MTBF, contudo a forma como é orientada a avaliação no fluxograma não permite uma avaliação criteriosa. No modelo proposto a alternativa esta alocada na classe de criticidade alta.

Outro ponto observado é a distribuição das alternativas entre as classes, apresentado no quadro 14, promovido pela classificação ABC. Apesar de apresentar a maior parte dos equipamentos na classe de menor criticidade, o que seria um aspecto positivo para o planejamento de manutenção, muitas dessas alternativas apresentam valores críticos em critérios como indisponibilidade e MTBF.

Quadro 14 – Comparação Classificação ABC x Modelo

Classes	Classificação ABC	Modelo Multicritério
Classe Alta	38 alternativas	14 - Classe Altíssima
		12 - Classe Alta
		11 - Classe Média
		1 - Classe Baixa
Classe Média	13 alternativas	4 - Classe Alta
		6 - Classe Média
		3 - Classe Baixa
Classe Baixa	102 alternativas	18 - Classe Alta
		40 - Classe Média
		44 - Classe Baixa

Fonte: Autor (2015)

No quadro é possível observar as diferenças de classificação presente em cada classe da classificação ABC comparada com a classificação proposta pelo modelo multicritério. Dos 102 equipamentos classificados com criticidade baixa pelo método ABC, 18 foram classificados com criticidade alta pelo modelo multicritério, o que exige uma atenção especial do departamento de manutenção.

Outro método de avaliação de criticidade utilizado na comparação com o modelo proposto pelo trabalho foi o Número de Risco, onde foram avaliados a gravidade da falha do equipamento e a sua frequência. Para o cálculo da severidade foram utilizados os critérios (g_1 , g_2 e g_3), em razão do seu peso, e para calcular a frequência da falha foi utilizado o critério do MTBF.

Na avaliação do RPN foram utilizados 04 classes de criticidade, conforme o modelo proposto, onde os limites de cada classe foram definidos pelos decisores. O quadro 15 apresenta o resultado da avaliação do número de risco e as comparações com o resultado do modelo.

Quadro 15 – Comparação RPN x Modelo

Classes	RPN	Modelo Multicritério
Classe Altíssima	10 alternativas	6 - Classe Altíssima 3- Classe Alta 1 - Classe Média
Classe Alta	24 alternativas	1 - Classe Altíssima 11 - Classe Alta 10 - Classe Média 2 - Classe Baixa
Classe Média	27 alternativas	2 - Classe Altíssima 2 - Classe Alta 13 - Classe Média 10 - Classe Baixa
Classe Baixa	92 alternativas	5 - Classe Altíssima 18 - Classe Alta 33 - Classe Média 36 - Classe Baixa

Fonte: Autor (2015)

Apesar de apresentar o mesmo número de classes do modelo multicritério, a avaliação RPN apresentou diferenças na classificação. Assim como na classificação ABC, na avaliação RPN houve uma concentração de alternativas avaliadas com baixa criticidade, das quais 23 foram classificadas com criticidade alta quando avaliadas pelo modelo.

A principal deficiência do RPN quando comparado ao modelo é a utilização de apenas dois critérios e ausência de um sistema de pesos. No cálculo da severidade foram utilizados três critérios, os quais no modelo proposto foram avaliados de forma individual e com pesos distintos, além disso a ausência de um sistema de peso diminuiu consideravelmente o desempenho das alternativas que apresentaram um baixo desempenho no MTBF, mesmo quando essas apresentavam altos valores nos critérios que formavam a severidade.

5 CONCLUSÃO

A classificação através do ELECTRE TRI forneceu uma visão sistêmica e coerente do conjunto de equipamentos avaliados, o que possibilitou uma atuação imediata em áreas consideradas extremamente críticas pela equipe de decisores e permitiu otimizar o planejamento das atividades de manutenção a serem executadas conforme o resultado da classificação nas áreas com criticidade intermediária.

A utilização de *softwares* na aplicação do modelo diminuiu a resistência da equipe técnica durante a adoção da ferramenta, pois não foi necessário aos decisores compreender as relações matemáticas de cada método, apenas a compreensão dos conceitos básicos de cada ferramenta durante a etapa de modelagem.

A aplicação da ferramenta multicritério permitiu uma distribuição uniforme dos equipamentos entre as classes críticas de forma coerente com o seu desempenho em cada critério. Critérios como risco a segurança, impacto a qualidade e indisponibilidade são fundamentais no processo avaliado, contudo uma avaliação baseada somente nesses critérios em detrimento de outros não refletiria a real criticidade do equipamento. Nesse sentido o modelo multicritério permitiu uma avaliação conjunta de todos os critérios e as relações existentes entre eles.

Quando o modelo foi comparado com os métodos ABC e RPN, alguns equipamentos avaliados como críticos por estes métodos, apresentavam uma criticidade menor no modelo multicritério, reflexo de uma avaliação ponderada de todos os critérios e não somente dos critérios com maior peso. Da mesma forma, equipamentos que apresentavam uma criticidade baixa nos métodos tradicionais, baseado somente em alguns critérios, foram classificados como críticos pelo modelo multicritério.

A ordenação executada no modelo permitiu aos decisores priorizar os equipamentos e ações a serem executadas nas classes com criticidade intermediária. A aplicação do PROMETHEE II apresentou-se como inteligível aos decisores em razão da associação gráfica das preferências através dos seis tipos de critérios generalizados.

Durante a ordenação, devido ao procedimento prévio de classificação, as pequenas diferenças de desempenho foram fundamentais na avaliação das alternativas, além de destacar a participação dos critérios de pesos intermediários. A análise de sensibilidade constatou a consistência do modelo que apresentou uma

baixa variabilidade no resultado da ordenação mesmo sob variações nos pesos dos critérios.

Nesse contexto, considera-se que os objetivos do trabalho foram atingidos, com o desenvolvimento de um modelo estruturado para análise de criticidade com a utilização da metodologia multicritério. Com o suporte do trabalho desenvolvido é possível aplicar o modelo em outros segmentos industriais nos quais seja necessário avaliar a criticidade de seus equipamentos, com a possibilidade de adaptar as etapas e metodologia utilizada em razão da natureza do equipamento ou processo o qual se deseja avaliar, não sendo necessário utilizar os mesmos critérios aqui aplicados.

O modelo pode ser integrado a metodologias de manutenção como o RCM, durante etapas de classificação dos equipamentos e análise de falhas, e a filosofia de Manutenção Produtiva Total (MPT) associada ao pilar de manutenção planejada, com intuito de otimizar a gestão das ações de manutenção e melhorar a visão técnica da equipe sobre o equipamento.

Cabe ressaltar que os métodos multicritérios não apresentam uma solução ótima para o problema, mas uma solução coerente através do equilíbrio do processo de decisão e das relações existentes entre as alternativas, critérios e preferências dos decisores.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

O modelo apresentado pelo trabalho pode ser aprimorado na medida em que for empregado em aplicações similares. Um dos pontos a ser incluído é um estudo mais aprimorado dos critérios e quais possuem maior representatividade na criticidade de equipamentos industriais, o qual pode ser realizado baseado na literatura específica da área, consulta a órgãos e normas, consulta a empresas, entre outros.

Com objetivo de sistematizar e otimizar o processo de análise, pode ser desenvolvido um software que integre todas as etapas do modelo, desde a construção da matriz de avaliação, na forma de planilha eletrônica, modelagem de preferências e aplicação dos métodos multicritérios, uma vez que no trabalho estas etapas foram realizadas de forma individual e com sistemas distintos.

Outro ponto importante na aplicação consiste na definição dos pesos para os critérios. A abordagem utilizada no trabalho foi definida devido ao conhecimento prévio

dos decisores sobre a mesma. Como sugestão podem ser pesquisados outros métodos que considerem, além da preferência dos decisores, características do regime de operação do equipamento, indicadores do segmento em que é realizada a análise, entre outros.

Tanto na aplicação numérica, quanto no desenvolvimento do modelo foram consideradas as preferências coletiva do grupo de decisores no desenvolvimento dos critérios e na modelagem de preferências. Em aplicações mais específicas, o modelo pode considerar as preferências individuais de cada decisor no processo de análise, com a utilização de modelos matemáticos na agregação de suas preferências, uma vez que visões distintas podem contribuir de forma positiva na transparência e aceitabilidade do modelo.

REFERÊNCIAS

- ACKOFF, R; SASIENI, M. W. **Pesquisa Operacional**. 1ª ed. Tradução de José L. Moura e Cláudio G. Reis. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 523 p., 1971.
- ALARCON, M.J.; GRAU, Juan B.; TORRES, J. Application of ELECTRE I Method to Restoration Actions in Telecommunication Network Maintenance. In: Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium. **Anais...** p.3430-3434, jun. 2007.
- ALMEIDA, Adiel F. Multicriteria Model for Selection of Preventive Maintenance Intervals. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 28, n. 6, p. 585-593, oct. 2012.
- ALMEIDA, Adiel T. Modelagem multicritério para seleção de intervalos de manutenção preventiva baseada na teoria da utilidade multiatributo. **Pesquisa Operacional**, v.25, n.1, p.69-81, abr. 2005.
- ALMEIDA, Adiel T. Multicriteria decision making on maintenance: Spares and contracts planning. **European Journal of Operational Research**, v. 129, n. 2, p. 235-241, mar. 2001.
- ALMEIDA; Adiel T. Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 12, p. 3569-3574, dec. 2007.
- AL-NAJJAR, Basim; ALSYOUF, Imad. Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. **International Journal of Production Economics**, v. 84, n. 1, p. 85-100, abr. 2003.
- ALSYOUF, Imad. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. **International Journal Production Economic**, v. 121, n. 1, p. 212-223, mai. 2009.
- ARUNRAJ, N.S.; MAITI, J. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. **Safety Science**, v. 48, n. 2, p. 238-247, feb. 2010.
- AVEN, Terje. Identification of safety and security critical systems and activities. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 2, p. 404-411, feb. 2009.
- AYADI, D.; AZZABI, L.; KOBI, A; BACHAR, K.; ROBLEDO, C. A multicriteria failure mode and effects analysis approach for optimizing human safety. In: Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2013. **Anais...** Proceedings – Annual, p.1,9, 28-31, jan. 2013.

BERTOLINI, Massimo, BEVILACQUA, Maurizio. A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 91, n. 7, p. 839-848, jul. 2006.

BEVILACQUA, M. & BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 70, n. 1, p. 71-83, oct. 2000.

BINDER, F. V. **Sistemas de apoio à decisão**. São Paulo: Érica, 1994.

BRAGLIA, Marcello. MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 17, n. 9, p.1017 – 1033, 2000.

CAMPBELL, John D.; JARDINE, Andrew K. S. **Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions**. 1ª ed. New York: Marcel Dekker Inc.: 2001.

CARNERO, M.C. Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. **Decision Support Systems**, v. 38, n. 4, p. 539-555, jan. 2005.

CAROT, V.; SANZ, J. Criticality and sensitivity analysis of the components of a system. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 68, n. 2, p. 147–152, may. 2000.

CERTA, Antonella; ENEA, Mario; LUPO, Toni. ELECTRE III to dynamically support the decision maker about the periodic replacements configurations for a multi-component system, **Decision Support Systems**, v. 55, n. 1, p. 126-134, abr. 2013.

CHAREONSUK, Chaichan; NAGARUR, Nagen; TABUCANON, Mario T. A multicriteria approach to the selection of preventive maintenance intervals. **International Journal of Production Economics**, v. 49, n. 1, p. 55-64, mar. 1997.

CHECKLAND, P. **Systems thinking, systems practice**. Chichester: John Wiley, 1981.

CHEN, Jih-Kuang; LEE, Yu-Cheng. Risk Priority Evaluated by ANP in Failure Mode and Effects Analysis. In: Proceedings of the 12th International Conference on ISO 9000 & TQM (12-ICIT), 2007. **Anais...** ed. Samuel Ho, p. 1-6, 2007.

CHENG, Zhonghua; JIA, Xisheng; GAO, Ping; WU, Su & WANG, Jianzhao. A framework for intelligent reliability centered maintenance analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 6, p. 806-814, jun. 2008.

CHO, Keun Tae. Multicriteria decision methods: An attempt to evaluate and unify. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 37, n. 9–10, p. 1099-1119, may. 2003.

COSTA, Carlos A. B.; CARNERO, María C.; OLIVEIRA, Mónica D. A multi-criteria model for auditing a Predictive Maintenance Programme. **European Journal of Operational Research**, v. 217, n. 2, p. 381–393, mar. 2012.

COSTA, H. G.; FREITAS, A. L. P. Aplicação do método Electre Tri à classificação e satisfação de clientes: um estudo de caso em um curso de extensão universitária. **Revista Portuguesa e Brasileira de Gestão, INDEG/ISCTE**, Lisboa, Portugal, v.4, n.4, p.66-76, out./dez. 2005.

DHILLON, B. S. **Maintainability, maintenance and reliability for Engineers**. 1^a ed. New York: CRC Press, 2006.

DO NASCIMENTO, Luiz Fernando. **Modelo multicritério de apoio à decisão para classificação de risco em operações com aeronaves embarcadas**. 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área de Produção, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2012.

FERREIRA, Rodrigo J. P.; ALMEIDA, Adiel T.; CAVALCANTE, Cristiano A. V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, n. 5, p. 905-912, mai. 2009.

FIGUEIRA, J.; MOUSSEAU, V. ; ROY, B. ELECTRE methods. In: FIGUEIRA, J. GRECO, S.; EHRGOTT, M. (Ed.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. Springer Science, 2005.

FILHO, G. B. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. 1^a ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

FRANCO, L. Alberto. Problem structuring methods as intervention tools: Reflections from their use with multi-organisational teams. **Omega**, v. 37, n. 1, p. 193-203, feb. 2009.

FRANCO, L. Alberto; CUSHMAN, Mike & ROSENHEAD, Jonathan. Project review and learning in the construction industry: Embedding a problem structuring method within a partnership context. **European Journal of Operational Research**, v. 152, n. 3, p. 586-601, feb. 2004.

GARZA, Luiz. **A Case Study of the Application of Reliability Centered Maintenance (RCM) in the Acquisition of the Advanced Amphibious Assault Vehicle (AAAV)**. 2002. 85 f. Thesys (Master) – Naval Postgraduate School, United States Navy. California, 2002.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo. Atlas, 2002.

GOMES, Luiz F. A. M. & GOMES, Carlos F. S. **Tomada de Decisão Gerencial: enfoque multicritério**. 4ª. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2012.

GUTIÉRREZ, A. M. **Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios: enfoque sistémico kantiano**. 1ª. ed. Colômbia: AMG, 2005.

HEADQUARTERS. **Failure Modes, Effects and Criticality Analyses (FMECA) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities**. Technical Manual (TM 5-698-4). Department of the Army. Washington, DC, 2006.

HELMANN, Kurtt S. **UMA SISTEMÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DA CRITICIDADE DE EQUIPAMENTOS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS BASEADA NA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**. 95f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2010.

HIJES, Félix C. G. L.; CARTAGENA, José J. R. Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipments. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 91, n. 4, p. 444–451, apr. 2006.

HOKSTAD, Per & TRYGVE, Steiro. Overall strategy for risk evaluation and priority setting of risk regulations. **Reliability Engineering and System Safety**, n. 9, p. 100-111, 2006.

HORENBEEK, Adriaan V.; PINTELON, Liliane & MUCHIRI, Peter. Maintenance optimization models and criteria. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**. v. 1, n. 3, p. 189-200, jul-sep. 2010.

HUADONG, Yang; ZHIGANG, Bai. Risk Evaluation of Boiler Tube Using FMEA. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS AND KNOWLEDGE DISCOVERY. 7, 2011. **Anais...: IEEEExplore Digital Library**, 2009. p. 81-85.

IGBA, Joel; ALEMZADEH, Kazem; ANYANWU-EBO, Ike; GIBBONS, Paul & FRISS, John. A Systems Approach Towards Reliability-Centred Maintenance (RCM) of Wind Turbines, **Procedia Computer Science**, v. 16, p. 814-823, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION'S. **IEC 60812: Analysis techniques for system reliability – procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)**. Switzerland, 2006.

ISHIZAKA, Alessio; NEMERY, Philippe. Assigning machines to incomparable maintenance strategies with ELECTRE-SORT. **Omega**, v. 47, p. 45-59, sep. 2014.

JAPAN INSTITUTE FOR PLANT MAINTENANCE (JIPM). **600 Forms Manual**. Japan, 1995.

JIAN-MING, Cai; *et al.* The Risk Priority Number methodology for distribution priority of emergency logistics after earthquake disasters. *Management Science and Industrial Engineering (MSIE)*, 2011 International Conference on..., p.560-562, 8-11 Jan. 2011.

KARDEC, A.; NASFIC, J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

LANDRY, Maurice; MALOUIN, Jean-Louis & ORAL, Muhittin. Model validation in operations research. **European Journal of Operational Research**, v. 14, n. 3, p. 207-220, nov. 1983.

LEE, Yun-Seong; KIM, Dong-Jin; KIM, Jin-O & KIM, Hyungchul. New FMECA Methodology Using Structural Importance and Fuzzy Theory. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v.26, n.4, p.2364-2370, nov. 2011.

LEVERETTE, J. C. An Introduction to the US Naval Air System Command RCM Process and Integrated Reliability Centered Maintenance Software. In: RCM 2006 - The Reliability Centred Maintenance Managers' Forum. 2006. **Anais...** p. 22-29.

LI, Changyou; XU, Minqiang; GUO, Song. ELECTRE III Based on Ranking Fuzzy Numbers for Deterministic and Fuzzy Maintenance Strategy Decision Problems. In: Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on. **Anais...** p.309,312, 18-21 aug. 2007

LIU, Yu; HUANG, Hong-Zhong. Optimal Selective Maintenance Strategy for Multi-State Systems Under Imperfect Maintenance. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 59, n. 2, p. 356-367, jun. 2010.

LU, S., TU, Y.-C. e LU, H. Predictive condition-based maintenance for continuously deteriorating systems. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 23, n. 1, p. 71-81, feb. 2007.

LYNCH, P.; ADENDORFF, K.; YADAVALLI, V. S. S.; ADETUNJI, O. Optimal spares and preventive maintenance frequencies for constrained industrial systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, n. 3, p. 378 – 387. Jul, 2013.

MILITARY STANDARD. **MIL-1629**. Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. US DEPARTMENT DEFENSE. Washington, DC, 1980.

MINGERS, John & ROSENHEAD, Jonathan. Problem structuring methods in action. **European Journal of Operational Research**, v. 152, n. 3, p. 530-554, feb. 2004.

MOBLEY, K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, **Maintenance Engineering Handbook**. 7ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

MOHIDEEN, P.B. Ahamed; RAMACHANDRAN, M. & NARASIMMALU; Rajam Ramasamy. Construction plant breakdown criticality analysis – part 1:UAE perspective. **Benchmarking: An International Journal**, v. 18, n. 4, p.472-489, 2011.

MOMENI, Mansour; FATHI, Mohammad R.; ZARCHI, Mohammad K. and AZIZOLLAHJ, Sirous. A Fuzzy TOPSIS-Based Approach to Maintenance Strategy Selection: A Case Study. **Middle-East Journal of Scientific Research**, v. 8, n. 3, p. 699-706, 2011.

MOREIRA, M.P.; DUPONT, C.J.; VELLASCO, M. M B R, PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE Multicriteria Methods for Ranking Equipment Failure Modes, In: Intelligent System Applications to Power Systems-ISAP, 2009. **Anais...15th International Conference on**, p.1,6, 8-12, nov. 2009.

MOREIRA, Marcela Pinheiro. **Priorização dos modos de falha de equipamentos utilizando os métodos de análise multicritério PROMETHEE e Fuzzy-PROMETHEE**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MOSS, T. R. & WOODHOUSE, J. Criticality analysis revisited. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 15, n. 2, p. 117-121, mar. 1999.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**: second edition. 2^a. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

MOUSSEAU V.; SLOWINSKI, R; ZIELNIEWICZ, PP. A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support. **Computers & Operations Research**, v 27, p. 757-777, 2000.

MOUSSEAU, V.; FIGUEIRA, J.; NAUX, J.-Ph. Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results. **European Journal of Operational Research**, v. 130, n. 2, p. 263-275, apr. 2001.

NAVAIR. **Management Manual**: guidelines for the naval aviation Reliability-Centered Maintenance Process. NAVAIR 00-25-403. Naval Air Systems Command. USA, 2005.

NAVSEA. **Reliability-Centered Maintenance (RCM) Handbook**. S9081-AB-GIB-010. Naval Sea Systems Command. USA, 2007.

NGUYEN, T.P. Khanh; YEUNG, Thomas G.; CASTANJER, Bruno. Optimal maintenance and replacement decisions under technological change with consideration of spare parts inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 143, n. 2, p. 472-477, jun. 2013.

NORDGARD, D.E.; HEGGSET, J.; OSTGULEN, E. Handling maintenance priorities using multi criteria decision making. In: Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE, Bologna. **Anais...** Bologna: IEEE, 2003. v. 3, p.23-26.

NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. **Reliability-Centered Maintenance**. 1ª. ed. Califórnia: Dolby Acess Press, 1978.

PAPIC, Ljubisa; ARONOV, Joseph & PANTELIC, Milorad. Safety Based Maintenance Concept. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, New Jersey (USA), v. 16, n. 6, p. 533–549, dec. 2009.

PÉRES, François; NOYES, Daniel. Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 19, n. 2, p. 129-148. 2003.

RAUSAND, Marvin. Reliability Centered Maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121-132, may. 1998.

RIBEIRO, Giovani C. A importância dos critérios de sustentabilidade na definição da criticidade dos equipamentos analisados sob a ótica de RCM2. **Revista Comisión de Integración Energética Regional (CIER)**, n. 55, p. 3-10, jun. 2010.

ROY, B. **Methodologie multicritere d'Aide a la decision**. Paris: Economica, 1985.

ROY, B. **Multicriteria for Decision Ainding**. London: Kluwer Academic Publishers, 1995.

ROY, B.; BOUYSSOU, D. **Aide multicritère à la décision: methodes et cas**. Paris: Economica, 1993.

ROY, Bernard; VANDERPOOTEN, Daniel. An overview on “The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works”. **European Journal of Operational Research**, v. 99, n. 1, p. 26-27, may. 1997.

SACHDEVA, A; KUMAR, P.; KUMAR, D. Maintenance criticality analysis using TOPSIS. In: Industrial Engineering and Engineering Management, 2009, IEEE International Conference on. **Anais...** p.199,203, 8-11, dec. 2009.

SALMERON, Jose L. & LOPEZ, Cristina. A multicriteria approach for risks assessment in ERP maintenance. **Journal of Systems and Software**, v. 83, n 10, p. 1941-1953, oct. 2010.

SIQUEIRA, Y. P. D. S. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implantação**. 1ª (Reimpressão). ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SMITH, A. M.; HINCHCLIFFE, G. R. **RCM: gateway to world class maintenance**. 2^a. ed. Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, v. 1, 2004.

SMITH, David J. **Reliability, Maintainability and Risk: practical methods for engineers**. 6^a. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

SMITH, R.; MOBLEY, R. K. **Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers**. 1^o. ed. Burlington: Butterworth Heinemann, 2007.

SMITH, Ricky; HAWKINS, Bruce. **Lean maintenance : reduce costs, improve quality, and increase market share**. 1^a. ed. Burlington, MA: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2004.

SOLA, Antonio V. H.; MOTA, Caroline M. M.; KOVALESKI, João L. A model for improving energy efficiency in industrial motor system using multicriteria analysis. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3645–3654, jun. 2011.

STUART, Anderson & FELICI, Massimo. Safety, reliability and security of industrial computer systems. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 81, n. 3, p. 1-5, sep. 2003.

TAN, Zhaoyang; LI, Jianfeng; WU, Zongzhi; ZHENG, Jianhu, HE, Weifeng. An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. **Safety Science**, v. 49, n. 6, p. 852-860, jul. 2011.

TENG, Sheng-Hsien & HO, Shin-Yann. Failure mode and effects analysis: An integrated approach for product design and process control. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 13, n. 5, p.8 – 26, 2000.

THE EUROPEAN STANDARD. **EN 13306: maintenance terminology**. Brussels, 2001.

THOMAIDIS, T.V.; PISTIKOPOULOS, S. Criticality analysis of process systems. Reliability and Maintainability, 2004 Annual Symposium – RAMS, on...p. 451-458, 26-29 Jan. 2004.

TROJAN, Flávio. **Modelos multicritério para apoiar decisões na gestão da manutenção de redes de distribuição de água para a redução de custos e perdas**. 2012. 117f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

TROJAN, Flavio; MORAIS, Danielle C. Prioritising alternatives for maintenance of water distribution networks: A group decision approach. **Water Research Commission**, v. 38, n. 4, p. 555-564, jul. 2012.

TROJAN, Flavio; MORAIS, Danielle C. Using ELECTRE TRI to support maintenance of water distribution networks. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 2, p. 423-442, mai-aug. 2012.

TSOUKIÀS, Alexis. From decision theory to decision aiding methodology. **European Journal of Operational Research**. V. 187, n. 1, p. 138-161, may. 2008.

VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid**. New York: John Wiley, 1992.

WANG, Cheng-Hua & HWANG, Sheue-Ling. A stochastic maintenance management model with recovery factor. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 2, p. 154-164, Bingley (UK), abr-jun. 2004.

WANG, Ling; CHU, Jian; WU, Jun. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 1, p. 151-163, mai. 2007.

WANG, Yaping; PHAM, Hoang. A Multi-Objective Optimization of Imperfect Preventive Maintenance Policy for Dependent Competing Risk Systems With Hidden Failure. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 60, n. 4, p. 770-782, dec. 2011.

WESSELS, Willian R. & SAUTER, F. C. Reliability Analysis Required to Determine CBM Condition Indicators. In: Reliability and Maintainability Symposium. Fort Worth, 26-29 jan., 2009. **Anais...**: p. 454-459.

XENOS, H. G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. 1^a. ed. São Paulo: INDG TecS, 2004.

YU, W. **Aide multicritère à la décision dans la cadre de la problématique Du tri**: concepts, méthodes et applications. 1992. Thèse (Docteur en Informatique)-Université Paris-Dauphine, Paris.

YUAN, Yong; JIANG, Xiaomo; LIU, Xian. Predictive maintenance of shield tunnels. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 38, p. 69-86, set. 2013.

ZAIM, Selim; TURKYILMAZ, Ali; ACAR, Mehmet F.; AL-TURKI, Umar, DEMIREL, Omer F. Maintenance strategy selection using AHP and ANP algorithms: a case study. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 18, n. 1, p.16 – 29, 2012.

ZAMMORI, F.; GABBRIELLI, R. ANP/RPN: a multi criteria evaluation of the Risk Priority Number. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 28, n. 1, p. 85-104, feb. 2011.

ZELENY, Milan. Optimal system design with multiple criteria: De Novo programming approach. **Engineering Costs and Production Economics**, v. 10, n. 2, p. 89-94, jun. 1986.

Apêndice A – Padronização da Matriz de Avaliação do ELECTRE TRI

Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a1	4	80	178,08	100,00	5	100	1	20	1,88	32,41	4492	33,78	7434,26	100,00
a2	2	40	489,72	100,00	2	40	1	20	5,17	89,14	10107	76,02	3964,19	100,00
a3	3	60	311,64	100,00	3	60	1	20	3,29	56,72	10107	76,02	5850,83	100,00
a4	5	100	187,62	100,00	4	80	1	20	2,35	40,52	33690	100,00	1080,8875	69,56
a5	3	60	37,524	25,53	2	40	1	20	0,47	8,10	20214	100,00	350,9375	22,58
a6	3	60	311,64	100,00	3	60	1	20	3,29	56,72	10668,5	80,24	4166,33	100,00
a7	4	80	60,0384	40,84	2	40	1	20	0,752	12,97	20214	100,00	1392,52	89,61
a8	3	60	37,524	25,53	2	40	1	20	0,47	8,10	9545,5	71,79	283,5575	18,25
a9	1	20	112,572	76,58	2	40	1	20	1,41	24,31	10443,9	78,55	266,7125	17,16
a10	2	40	400,68	100,00	3	60	1	20	4,23	72,93	21337	100,00	3672,21	100,00
a11	2	40	445,2	100,00	3	60	1	20	4,7	81,03	21337	100,00	1628,35	100,00
a12	3	60	187,62	100,00	3	60	1	20	2,35	40,52	16845	100,00	631,6875	40,65
a13	3	60	150,096	100,00	3	60	1	20	1,88	32,41	10107	76,02	336,9	21,68
a14	4	80	187,62	100,00	5	100	1	20	2,35	40,52	21337	100,00	519,3875	33,42
a15	4	80	150,096	100,00	3	60	1	20	1,88	32,41	24706	100,00	1212,84	78,05
a16	2	40	187,62	100,00	3	60	1	20	2,35	40,52	21337	100,00	800,1375	51,49
a17	2	40	55,968	38,07	3	60	1	20	2,82	48,62	6738	50,68	308,825	19,87
a18	3	60	174,9	100,00	3	60	2	40	2,35	40,52	10668,5	80,24	743,9875	47,88
a19	1	20	60,0384	40,84	2	40	1	20	0,752	12,97	2470,6	18,58	1729,42	100,00
a20	1	20	60,0384	40,84	1	20	1	20	0,752	12,97	10668,5	80,24	336,9	21,68
a21	2	40	60,0384	40,84	2	40	1	20	0,752	12,97	17968	100,00	471,66	30,35

Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a22	2	40	187,62	100,00	3	60	1	20	2,35	40,52	6738	50,68	631,6875	40,65
a23	1	20	150,096	100,00	2	40	1	20	1,88	32,41	4716,6	35,47	505,35	32,52
a24	3	60	187,62	100,00	3	60	1	20	2,35	40,52	5053,5	38,01	70,1875	4,52
a25	3	60	187,62	100,00	3	60	1	20	2,35	40,52	4716,6	35,47	1600,275	100,00
a26	3	60	187,62	100,00	3	60	1	20	2,35	40,52	4716,6	35,47	1600,275	100,00
a27	3	60	187,62	100,00	3	60	1	20	2,35	40,52	5053,5	38,01	1993,325	100,00
a28	4	80	225,144	100,00	3	60	1	20	2,82	48,62	1684,5	12,67	758,025	48,78
a29	2	40	225,144	100,00	3	60	1	20	2,82	48,62	3930,5	29,56	533,425	34,33
a30	1	20	60,0384	40,84	2	40	1	20	0,752	12,97	2470,6	18,58	1729,42	100,00
a31	1	20	76,818	52,26	1	20	1	20	0,94	16,21	17572,8	100,00	466,7775	30,04
a32	4	80	192,045	100,00	5	100	1	20	2,35	40,52	3294,9	24,78	1784,7375	100,00
a33	1	20	107,415	73,07	2	40	1	20	1,6125	27,80	13728,75	100,00	634,26825	40,82
a34	2	40	192,045	100,00	1	20	2	40	2,6875	46,34	32949	100,00	727,62375	46,82
a35	1	20	35,805	24,36	1	20	1	20	0,5375	9,27	4612,86	34,69	969,24975	62,37
a36	3	60	115,227	78,39	3	60	1	20	1,6125	27,80	4612,86	34,69	1488,1965	95,77
a37	5	100	115,227	78,39	4	80	1	20	1,6125	27,80	3294,9	24,78	480,50625	30,92
a38	3	60	153,636	100,00	1	20	1	20	2,15	37,07	4612,86	34,69	713,895	45,94
a39	1	20	153,636	100,00	2	40	1	20	2,15	37,07	32949	100,00	1043,385	67,14
a40	2	40	192,045	100,00	3	60	1	20	2,6875	46,34	3294,9	24,78	562,87875	36,22
a41	1	20	61,4544	41,81	1	20	1	20	0,86	14,83	17572,8	100,00	461,286	29,68
a42	4	80	182,28	100,00	5	100	1	20	2,15	37,07	10433,85	78,47	7270,746	100,00

Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a43	2	40	192,045	100,00	1	20	1	20	2,6875	46,34	16474,5	100,00	1477,2135	95,06
a44	4	80	273,42	100,00	5	100	1	20	3,225	55,60	3844,05	28,91	5689,194	100,00
a45	4	80	38,409	26,13	2	40	1	20	0,5375	9,27	21966	100,00	1345,4175	86,58
a46	4	80	455,7	100,00	3	60	1	20	5,375	92,67	35145,6	100,00	5052,18	100,00
a47	1	20	153,636	100,00	2	40	1	20	2,15	37,07	13179,6	99,12	549,15	35,34
a48	1	20	35,805	24,36	1	20	2	40	0,5375	9,27	1317,96	9,91	398,13375	25,62
a49	3	60	153,636	100,00	3	60	1	20	2,15	37,07	16474,5	100,00	494,235	31,80
a50	1	20	57,288	38,97	2	40	1	20	0,86	14,83	21966	100,00	153,762	9,89
a51	1	20	31,746	21,60	1	20	1	20	0,5375	9,27	27457,5	100,00	321,25275	20,67
a52	3	60	50,7936	34,55	3	60	1	20	0,86	14,83	32949	100,00	461,286	29,68
a53	4	80	170,274	100,00	2	40	1	20	2,6875	46,34	21966	100,00	562,87875	36,22
a54	3	60	170,274	100,00	2	40	1	20	2,6875	46,34	10433,85	78,47	288,30375	18,55
a55	3	60	50,7936	34,55	2	40	1	20	0,86	14,83	2416,26	18,17	241,626	15,55
a56	1	20	50,7936	34,55	1	20	1	20	0,86	14,83	17572,8	100,00	461,286	29,68
a57	2	40	170,274	100,00	2	40	1	20	2,6875	46,34	16474,5	100,00	2114,2275	100,00
a58	2	40	282,828	100,00	2	40	1	20	3,7625	64,87	19769,4	100,00	1070,8425	68,91
a59	4	80	202,02	100,00	5	100	1	20	2,6875	46,34	4393,2	33,04	7303,695	100,00
a60	3	60	204,3288	100,00	4	80	1	20	3,114	53,69	20318,55	100,00	2833,614	100,00
a61	5	100	363,636	100,00	4	80	1	20	4,671	80,53	9767,235	73,46	2745,1071	100,00
a62	1	20	102,1644	69,50	2	40	1	20	1,557	26,84	3598,455	27,06	244,180875	15,71
a63	5	100	54,48768	37,07	4	80	1	20	0,8304	14,32	30843,9	100,00	431,8146	100,00
a64	3	60	54,48768	37,07	3	60	1	20	0,8304	14,32	18506,34	100,00	143,9382	9,26
a65	3	60	54,48768	37,07	3	60	1	20	0,8304	14,32	4626,585	34,80	431,8146	27,79

Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a66	1	20	34,0548	23,17	2	40	1	20	0,519	8,95	12337,56	92,79	539,76825	34,73
a67	5	100	282,828	100,00	4	80	1	20	3,633	62,64	22618,86	100,00	3505,9233	100,00
a68	5	100	238,3836	100,00	4	80	3	60	3,633	62,64	22618,86	100,00	1516,49175	97,59
a69	3	60	136,2192	92,67	3	60	1	20	2,076	35,79	18506,34	100,00	1542,195	99,24
a70	5	100	301,728	100,00	4	80	3	60	4,152	71,59	41125,2	100,00	3845,2062	100,00
a71	2	40	158,946	100,00	3	60	1	20	2,595	44,74	41125,2	100,00	269,884125	17,37
a72	4	80	188,58	100,00	5	100	1	20	2,595	44,74	4112,52	30,93	6837,0645	100,00
a73	3	60	190,7352	100,00	3	60	1	20	3,114	53,69	19020,405	100,00	5325,7134	100,00
a74	1	20	95,3676	64,88	2	40	1	20	1,557	26,84	3598,455	27,06	244,180875	15,71
a75	3	60	158,946	100,00	3	60	1	20	2,595	44,74	3598,455	27,06	1465,08525	94,28
a76	3	60	60,77472	41,34	3	60	1	20	0,8304	14,32	18506,34	100,00	143,9382	9,26
a77	3	60	60,77472	41,34	3	60	1	20	0,8304	14,32	4112,52	30,93	431,8146	27,79
a78	1	20	113,9526	77,52	2	40	1	20	1,557	26,84	12337,56	92,79	1187,49015	76,42
a79	3	60	189,921	100,00	3	60	1	20	2,595	44,74	9253,17	69,59	64,258125	4,14
a80	4	80	189,921	100,00	4	80	3	60	2,595	44,74	22618,86	100,00	3444,2355	100,00
a81	1	20	113,9526	77,52	2	40	1	20	1,557	26,84	4318,146	32,48	346,993875	22,33
a82	3	60	189,921	100,00	3	60	1	20	2,595	44,74	15421,95	100,00	1362,27225	87,66
a83	4	80	227,9052	100,00	3	60	1	20	3,114	53,69	22618,86	100,00	488,36175	31,43
a84	1	20	113,9526	77,52	2	40	1	20	1,557	26,84	18506,34	100,00	501,213375	32,25
a85	3	60	189,921	100,00	3	60	1	20	2,4175	41,68	4318,146	32,48	2698,84125	100,00
a86	1	20	60,77472	41,34	2	40	1	20	0,7736	13,34	15421,95	100,00	1151,5056	74,10
a87	2	40	189,921	100,00	3	60	1	20	2,4175	41,68	9253,17	69,59	64,258125	4,14
a88	1	20	113,9526	77,52	2	40	1	20	1,4505	25,01	9561,609	71,91	346,993875	22,33

Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a89	1	20	84,9816	57,81	1	20	1	20	1,1604	20,01	22618,86	100,00	390,6894	25,14
a90	3	60	84,9816	57,81	3	60	1	20	1,1604	20,01	3598,455	27,06	544,9089	35,06
a91	3	60	70,818	48,18	3	60	1	20	0,967	16,67	1130,943	8,51	8800,7928	100,00
a92	1	20	75,9684	51,68	2	40	1	20	0,967	16,67	16450,08	100,00	436,95525	28,12
a93	2	40	75,636	51,45	5	100	2	40	1,1604	20,01	15421,95	100,00	524,3463	33,74
a94	2	40	54,0912	36,80	5	100	2	40	0,7736	13,34	15421,95	100,00	514,065	33,08
a95	1	20	101,421	68,99	2	40	1	20	1,4505	25,01	12851,625	96,66	501,213375	32,25
a96	3	60	135,228	91,99	3	60	1	20	1,934	33,34	9767,235	73,46	6806,2206	100,00
a97	3	60	202,842	100,00	3	60	1	20	2,901	50,02	19020,405	100,00	5325,7134	100,00
a98	2	40	169,035	100,00	2	40	1	20	2,4175	41,68	15421,95	100,00	951,02025	61,20
a99	3	60	54,0912	36,80	3	60	1	20	0,7736	13,34	4112,52	30,93	431,8146	27,79
a100	1	20	54,0912	36,80	2	40	1	20	0,7736	13,34	18506,34	100,00	143,9382	9,26
a101	3	60	33,807	23,00	2	40	1	20	0,4835	8,34	15421,95	100,00	64,258125	4,14
a102	2	40	169,035	100,00	3	60	1	20	2,4175	41,68	3598,455	27,06	1465,08525	94,28
a103	1	20	31,515	21,44	2	40	1	20	0,4835	8,34	8351,25	62,81	385,63125	24,82
a104	1	20	33,807	23,00	2	40	1	20	0,4835	8,34	3930	29,56	130,18125	8,38
a105	5	100	481,32	100,00	4	80	1	20	5,802	100,03	32422,5	100,00	12634,95	100,00
a106	4	80	441,21	100,00	3	60	1	20	5,3185	91,70	21615	100,00	3664,725	100,00
a107	4	80	354,816	100,00	3	60	1	20	3,868	66,69	14737,5	100,00	540,375	34,77
a108	4	80	399,168	100,00	3	60	1	20	4,3515	75,03	14737,5	100,00	2623,275	100,00
a109	2	40	204,3288	100,00	3	60	1	20	2,901	50,02	21615	100,00	368,4375	23,71
a110	4	80	170,274	100,00	5	100	1	20	2,4175	41,68	4912,5	36,95	1891,3125	100,00
a111	3	60	136,2192	92,67	4	80	1	20	1,934	33,34	32422,5	100,00	1572	100,00

Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a112	1	20	54,48768	37,07	2	40	1	20	0,7736	13,34	2161,5	16,26	1513,05	97,36
a113	1	20	76,1904	51,83	2	40	1	20	1,1604	20,01	32422,5	100,00	501,075	32,24
a114	2	40	202,02	100,00	3	60	1	20	2,4175	41,68	5895	44,34	700,03125	45,05
a115	1	20	136,2192	92,67	2	40	1	20	1,934	33,34	5895	44,34	687,75	44,26
a116	4	80	136,2192	92,67	3	60	1	20	1,934	33,34	2238,5	16,84	508,75	32,74
a117	3	60	170,274	100,00	3	60	1	20	2,4175	41,68	15262,5	100,00	724,96875	46,65
a118	2	40	170,274	100,00	3	60	1	20	2,4175	41,68	9157,5	68,87	979,34375	63,02
a119	1	20	63,492	43,19	2	40	1	20	0,967	16,67	4578,75	34,44	432,4375	27,83
a120	3	60	136,2192	92,67	3	60	1	20	1,934	33,34	4070	30,61	1424,5	91,67
a121	3	60	204,3288	100,00	3	60	1	20	2,901	50,02	18823,75	100,00	2187,625	100,00
a122	2	40	170,274	100,00	3	60	1	20	2,4175	41,68	3561,25	26,78	1449,9375	93,30
a123	2	40	63,492	43,19	3	60	1	20	0,967	16,67	12210	91,83	686,8125	44,20
a124	1	20	63,492	43,19	2	40	1	20	1,038	17,90	15262,5	100,00	534,1875	34,38
a125	3	60	50,7936	34,55	3	60	1	20	0,8304	14,32	16280	100,00	427,35	27,50
a126	1	20	102,1644	69,50	2	40	1	20	1,557	26,84	12718,75	95,66	496,03125	31,92
a127	3	60	193,461	100,00	3	60	1	20	2,595	44,74	22385	100,00	3612,125	100,00
a128	2	40	61,90752	42,11	3	60	3	60	0,8304	14,32	15262,5	100,00	1872,2	100,00
a129	4	80	232,1532	100,00	4	80	3	60	3,114	53,69	1119,25	8,42	1984,125	100,00
a130	4	80	15,47688	10,53	4	80	3	60	0,2076	3,58	2035	15,31	462,9625	29,79
a131	3	60	193,461	100,00	3	60	1	20	2,595	44,74	3561,25	26,78	724,96875	46,65
a132	4	80	154,7688	100,00	2	40	3	60	2,076	35,79	22893,75	100,00	3378,1	100,00
a133	2	40	57,7104	39,26	3	60	3	60	0,8304	14,32	18315	100,00	1343,1	86,43
a134	2	40	61,90752	42,11	3	60	3	60	0,8304	14,32	15262,5	100,00	1872,2	100,00

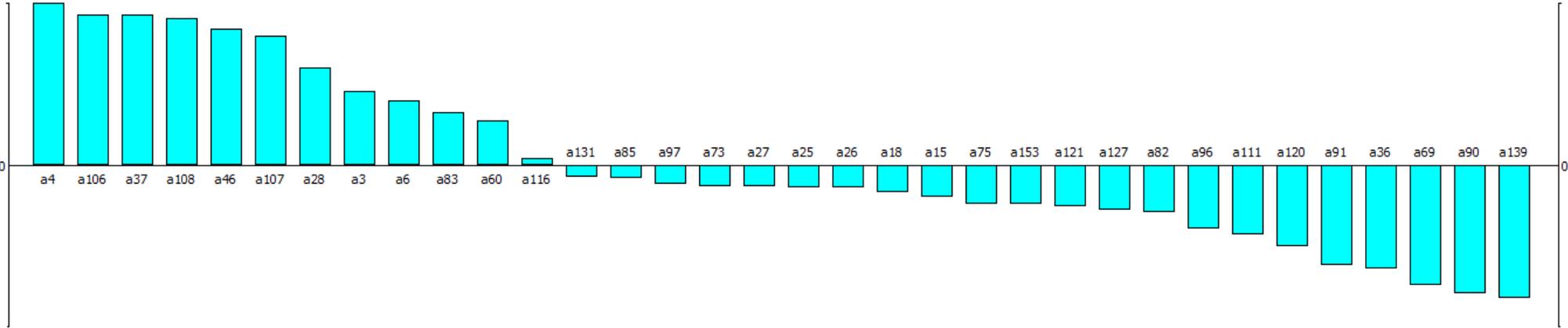
Alternativa	Risco a Segurança		Indisponibilidade		Qualidade		Meio-ambiente		MTTR		MTBF		Custo da Manutenção	
	g ₁ (pts.)	g ₁ (%)	g ₂ (min)	g ₂ (%)	g ₃ (pts.)	g ₃ (%)	g ₄ (pts.)	g ₄ (%)	g ₅ (hrs.)	g ₅ (%)	g ₆ (hrs.)	g ₆ (%)	g ₇ (R\$)	g ₇ (%)
a135	2	40	57,7104	39,26	3	60	3	60	0,8304	14,32	18315	100,00	1343,1	86,43
a136	4	80	193,461	100,00	2	40	3	60	2,7325	47,11	12718,75	95,66	3001,625	100,00
a137	3	60	36,069	24,54	2	40	1	20	0,5465	9,42	16280	100,00	470,59375	30,28
a138	4	80	154,7688	100,00	2	40	3	60	2,186	37,69	22893,75	100,00	3683,35	100,00
a139	3	60	116,0766	78,96	3	60	1	20	1,6395	28,27	15262,5	100,00	1907,8125	100,00
a140	1	20	154,7688	100,00	2	40	1	20	2,186	37,69	9157,5	68,87	661,375	42,56
a141	2	40	193,461	100,00	3	60	1	20	2,7325	47,11	18315	100,00	3001,625	100,00
a142	5	100	57,7104	39,26	4	80	1	20	0,8744	15,08	1322,75	9,95	610,5	39,29
a143	3	60	193,461	100,00	3	60	1	20	2,7325	47,11	15262,5	100,00	521,46875	33,56
a144	3	60	36,069	24,54	2	40	1	20	0,5465	9,42	1017,5	7,65	521,46875	33,56
a145	3	60	31,383	21,35	2	40	1	20	0,4755	8,20	4578,75	34,44	470,59375	30,28
a146	3	60	31,383	21,35	2	40	1	20	0,4755	8,20	1017,5	7,65	521,46875	33,56
a147	1	20	67,3308	45,80	2	40	1	20	0,951	16,40	1526,25	11,48	228,9375	14,73
a148	1	20	53,86464	36,64	2	40	1	20	0,7608	13,12	12718,75	95,66	508,75	32,74
a149	1	20	50,2128	34,16	2	40	1	20	0,7608	13,12	18315	100,00	223,85	14,40
a150	2	40	168,327	100,00	3	60	1	20	2,3775	40,99	9157,5	68,87	1653,4375	100,00
a151	2	40	168,327	100,00	3	60	1	20	2,3775	40,99	3561,25	26,78	2670,9375	100,00
a152	1	20	31,383	21,35	2	40	1	20	0,4755	8,20	30525	100,00	470,59375	30,28
a153	3	60	168,327	100,00	3	60	1	20	2,3775	40,99	3561,25	26,78	653,74375	42,07

Apêndice B – Análise de Sensibilidade do PROMETHEE II

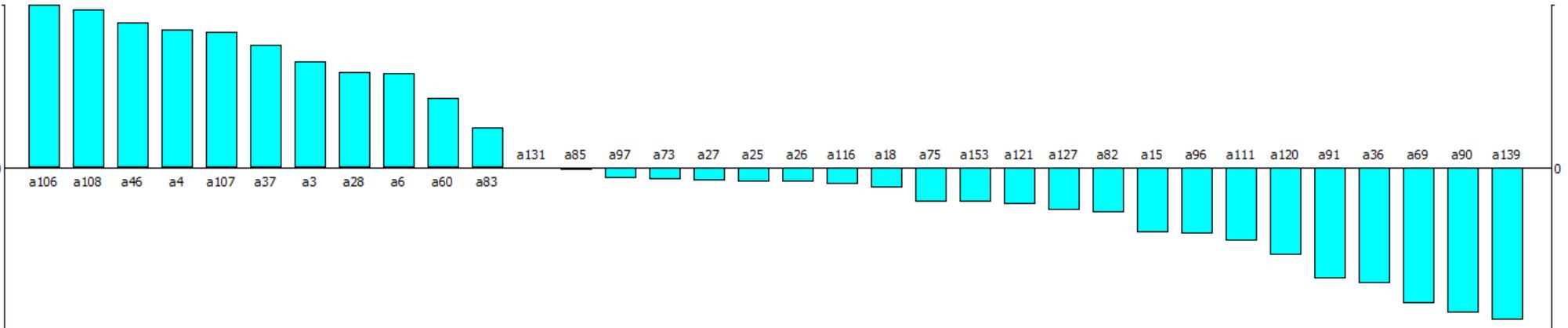
Variação dos pesos de cada critério

Riscos a Segurança (g1)							
Critérios	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Pesos originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑ 15%	3,3	1,7	2,2	0,5	0,7	1	0,5
↓ 15%	2,4	1,9	2,5	0,6	0,8	1,2	0,6
Indisponibilidade (g2)							
Critérios	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Pesos originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑ 15%	2,8	2,1	2,3	0,5	0,7	1,1	0,5
↓ 15%	3	1,5	2,5	0,6	0,8	1,1	0,6
Impacto na qualidade do produto (g3)							
Critérios	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Pesos originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑ 15%	2,7	1,7	2,8	0,5	0,7	1	0,5
↓ 15%	3	1,9	2	0,6	0,8	1,1	0,6
Riscos Ambientais (g4)							
Critérios	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Pesos originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑ 15%	2,9	1,8	2,3	0,6	0,7	1,1	0,6
↓ 15%	3	1,8	2,4	0,4	0,7	1,1	0,6
Tempo Médio de Reparo (g5)							
Critérios	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Pesos originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑ 15%	2,9	1,8	2,3	0,5	0,8	1,1	0,5
↓ 15%	2,9	1,8	2,4	0,6	0,6	1,1	0,6
Tempo Médio entre Falhas (g6)							
Critérios	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Pesos originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑ 15%	2,8	1,8	2,3	0,5	0,7	1,3	0,5
↓ 15%	3	1,9	2,4	0,6	0,7	0,9	0,6
Custo de Manutenção (g7)							
Critérios	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7
Pesos originais	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,6
↑ 15%	2,9	1,8	2,3	0,5	0,7	1,1	0,7
↓ 15%	2,9	1,8	2,4	0,5	0,7	1,1	0,5

Ranking das alternativas com aumento de 15% no critério “Risco a Segurança”

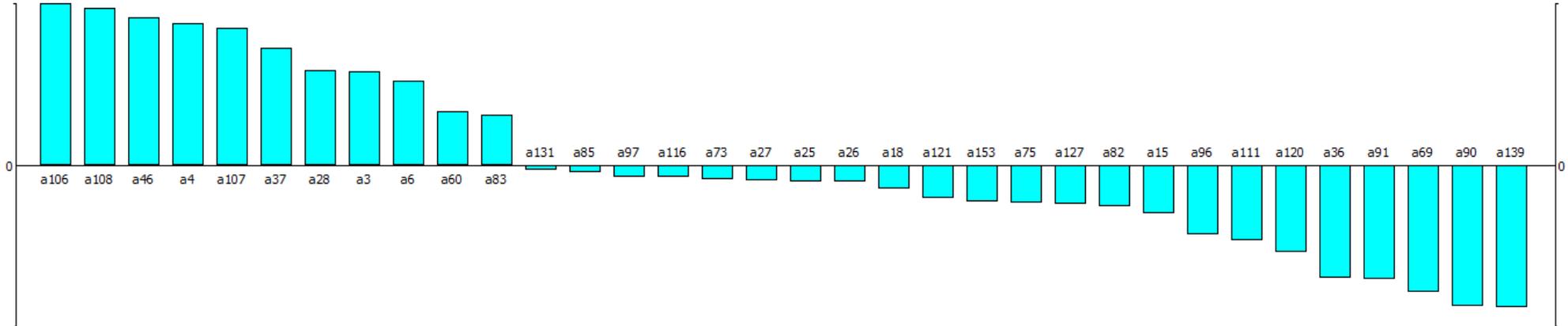


Ranking das alternativas com redução de 15% no critério “Risco a Segurança”

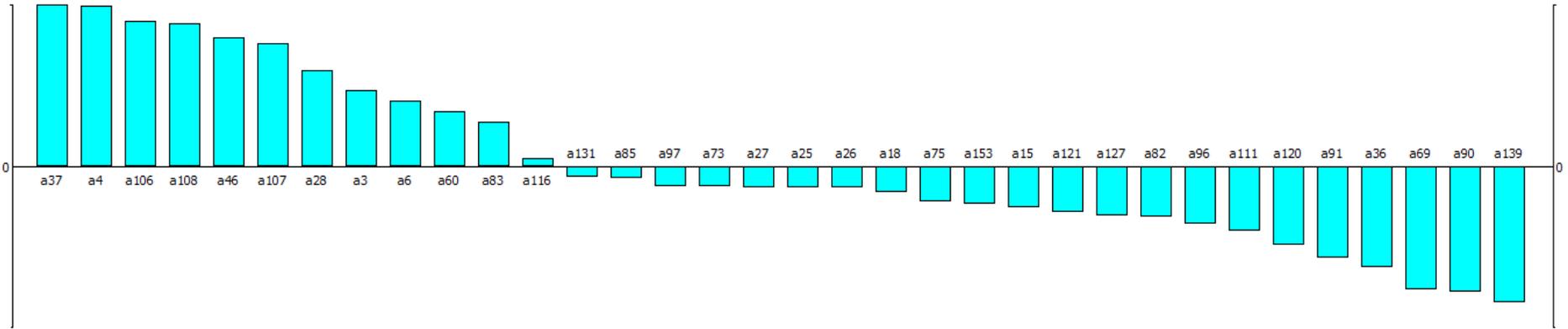


Indisponibilidade

Aumento 15%

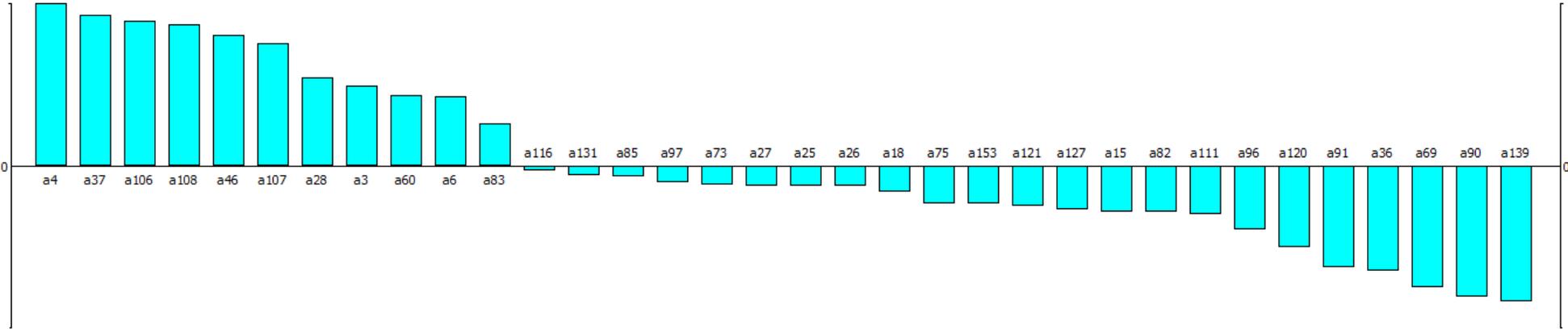


Redução 15%

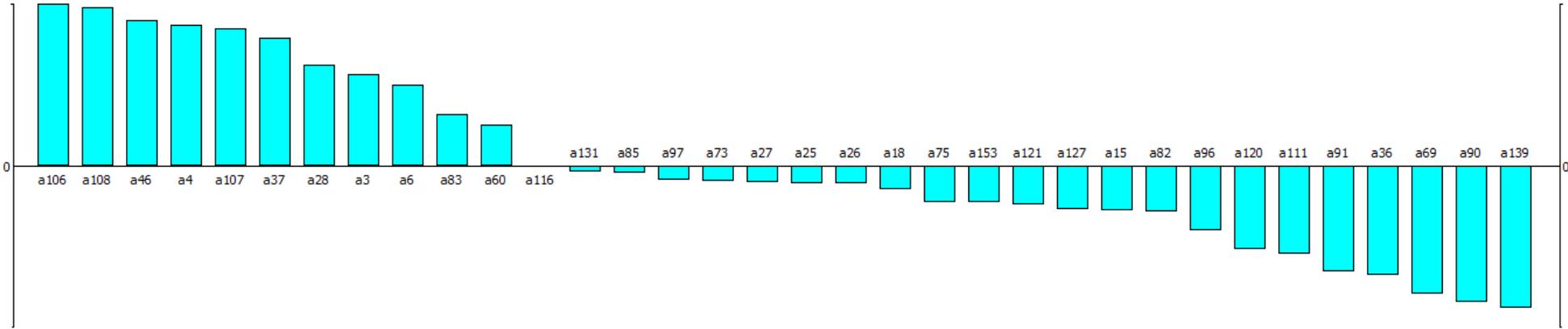


Impacto na qualidade

Aumento 15%

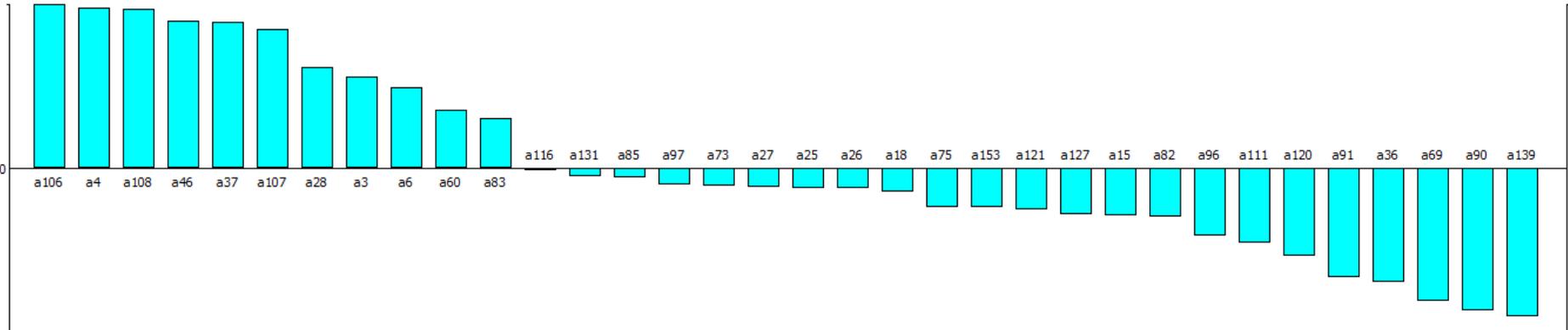


Redução 15%

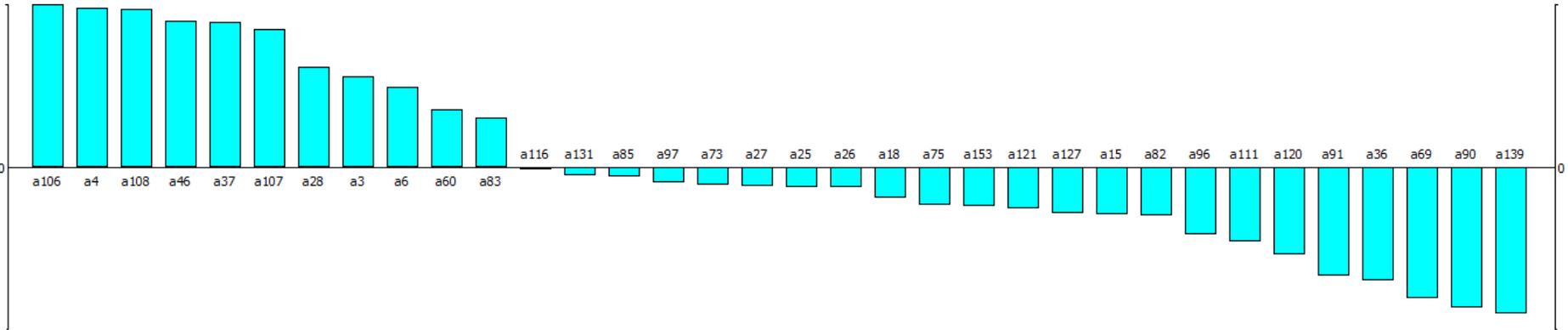


Riscos Ambientais

Aumento 15%

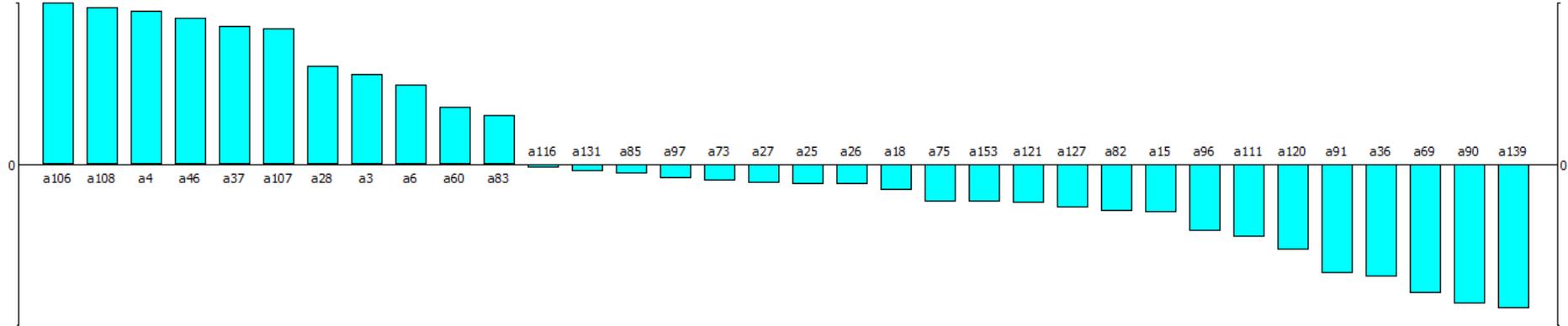


Redução 15%

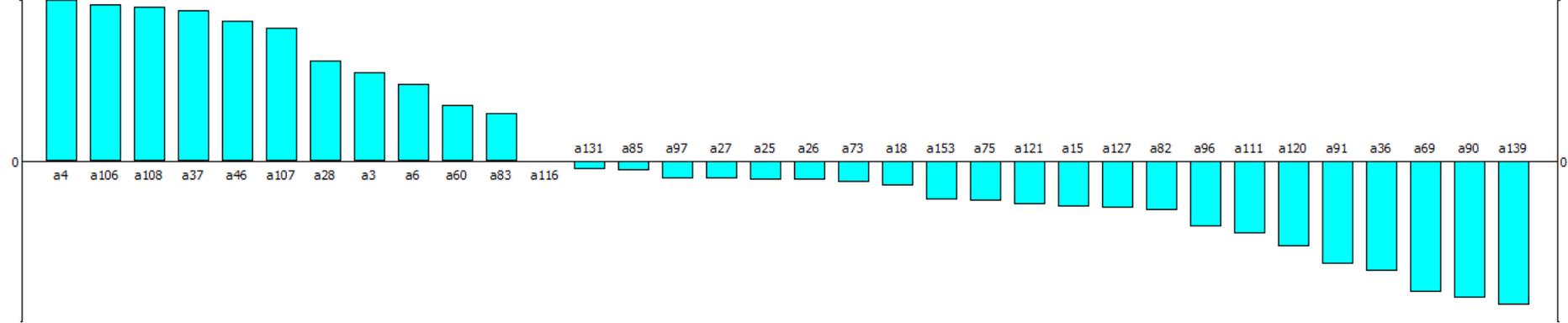


Tempo Médio de Reparo

Aumento 15%

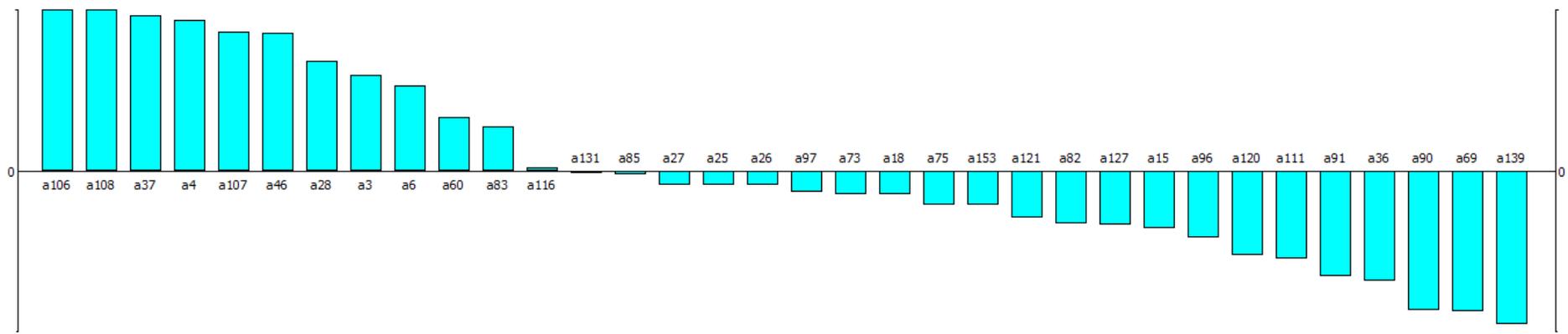


Redução 15%

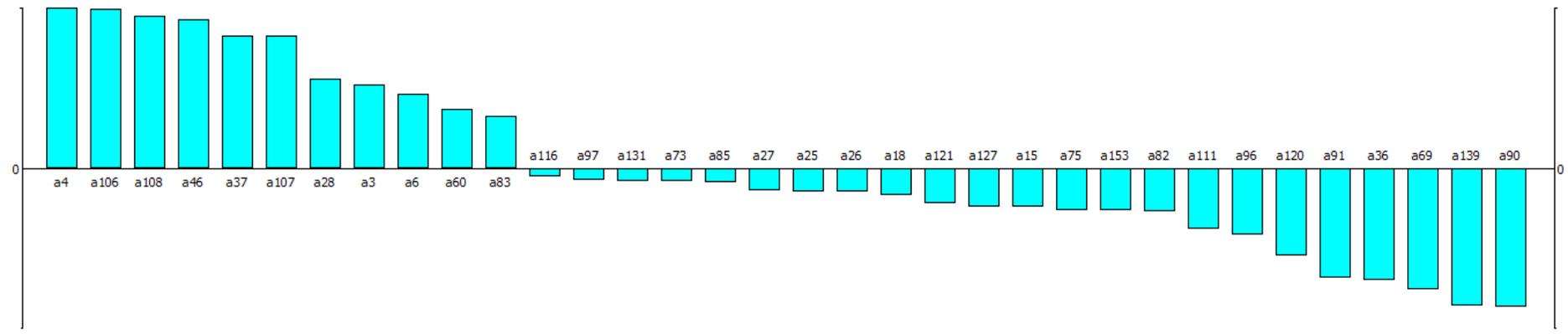


Tempo Médio entre Falhas

Aumento 15%



Redução 15%

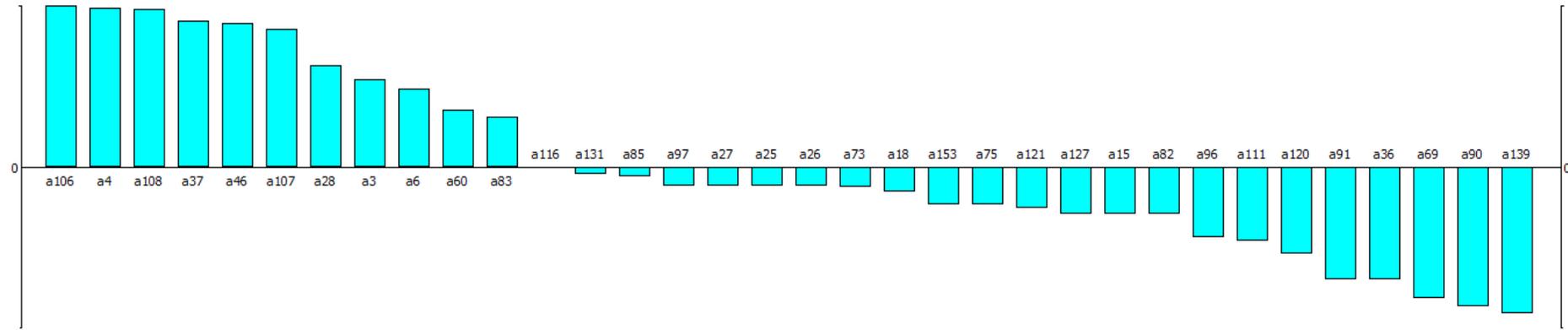


Custos de Manutenção

Aumento 15%



Redução 15%



Apêndice C – Comparação entre os métodos de classificação

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Motor AC	a ₁	80	100,00	100	33,33	32,41	33,78	100,00	Altíssima	Alta	Alta
Encoder incremental	a ₂	40	100,00	40	33,33	89,14	76,02	100,00	Média	Média	Média
Drive motor	a ₃	60	100,00	60	33,33	56,72	76,02	100,00	Alta	Média	Baixa
Cabos de alimentação	a ₄	100	100,00	80	33,33	40,52	100,00	69,56	Alta	Baixa	Alta
Ventilador	a ₅	60	25,53	40	33,33	8,10	100,00	22,58	Média	Baixa	Baixa
Conversor AC DC	a ₆	60	100,00	60	33,33	56,72	80,24	100,00	Alta	Baixa	Baixa
Chave Seccionador	a ₇	80	40,84	40	33,33	12,97	100,00	89,61	Média	Baixa	Alta
Fusíveis	a ₈	60	25,53	40	33,33	8,10	71,79	18,25	Média	Baixa	Baixa
Sensores Indutivo e Fim de curso	a ₉	20	76,58	40	33,33	24,31	78,55	17,16	Baixa	Baixa	Baixa
Fuso/ Buchas	a ₁₀	40	100,00	60	33,33	72,93	100,00	100,00	Média	Baixa	Média
Rolamentos	a ₁₁	40	100,00	60	33,33	81,03	100,00	100,00	Média	Baixa	Média
Correia Sincronizadas	a ₁₂	60	100,00	60	33,33	40,52	100,00	40,65	Média	Baixa	Baixa
Polias	a ₁₃	60	100,00	60	33,33	32,41	76,02	21,68	Média	Média	Baixa
Controle de tensão	a ₁₄	80	100,00	100	33,33	40,52	100,00	33,42	Média	Baixa	Alta
Articulações	a ₁₅	80	100,00	60	33,33	32,41	100,00	78,05	Alta	Baixa	Alta
Sensores ind analógico / atuador	a ₁₆	40	100,00	60	33,33	40,52	100,00	51,49	Média	Baixa	Baixa
Reservatório de Ar	a ₁₇	40	38,07	60	33,33	48,62	50,68	19,87	Média	Média	Baixa
Válvula Proporcional	a ₁₈	60	100,00	60	66,66	40,52	80,24	47,88	Alta	Baixa	Baixa
Conversor E/P	a ₁₉	20	40,84	40	33,33	12,97	18,58	100,00	Baixa	Média	Média
Pressostato	a ₂₀	20	40,84	20	33,33	12,97	80,24	21,68	Baixa	Baixa	Baixa
Mangueira / conexões	a ₂₁	40	40,84	40	33,33	12,97	100,00	30,35	Média	Baixa	Baixa

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Placa analógica do S7 I/O	a22	40	100,00	60	33,33	40,52	50,68	40,65	Média	Média	Baixa
Sensores de Pulso das Pinças	a23	20	100,00	40	33,33	32,41	35,47	32,52	Baixa	Média	Baixa
Processamento e programa	a24	60	100,00	60	33,33	40,52	38,01	4,52	Média	Alta	Baixa
Modulo Link Desbobinador de Papel	a25	60	100,00	60	33,33	40,52	35,47	100,00	Alta	Alta	Baixa
Modulo Link Sala elétrica de Papel	a26	60	100,00	60	33,33	40,52	35,47	100,00	Alta	Alta	Baixa
Rede Profibus / CPU S5	a27	60	100,00	60	33,33	40,52	38,01	100,00	Alta	Alta	Baixa
Fibras ópticas	a28	80	100,00	60	33,33	48,62	12,67	48,78	Alta	Altíssima	Alta
Freio, disco e pastilha	a29	40	100,00	60	33,33	48,62	29,56	34,33	Média	Alta	Baixa
Válvula Proporcional	a30	20	40,84	40	33,33	12,97	18,58	100,00	Baixa	Média	Média
Mangueira/ conexões pneumáticas	a31	20	52,26	20	33,33	16,21	100,00	30,04	Baixa	Baixa	Baixa
Cilindro de Borracha (Ruber Roll)	a32	80	100,00	100	33,33	40,52	24,78	100,00	Altíssima	Altíssima	Alta
Cilindro pneumáticos	a33	20	73,07	40	33,33	27,80	100,00	40,82	Baixa	Baixa	Baixa
Bompas de vácuo	a34	40	100,00	20	66,66	46,34	100,00	46,82	Baixa	Baixa	Baixa
Ventosas/ mangueiras e conexões	a35	20	24,36	20	33,33	9,27	34,69	62,37	Baixa	Baixa	Baixa
Bumpers	a36	60	78,39	60	33,33	27,80	34,69	95,77	Alta	Alta	Baixa
Facas	a37	100	78,39	80	33,33	27,80	24,78	30,92	Alta	Altíssima	Alta
Barras Paralelas	a38	60	100,00	20	33,33	37,07	34,69	45,94	Baixa	Alta	Baixa
Bombas de vácuo	a39	20	100,00	40	33,33	37,07	100,00	67,14	Baixa	Baixa	Baixa
Câmara de vácuo	a40	40	100,00	60	33,33	46,34	24,78	36,22	Média	Alta	Baixa
Mangueiras e conexões	a41	20	41,81	20	33,33	14,83	100,00	29,68	Baixa	Baixa	Baixa

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Motor AC	a42	80	100,00	100	33,33	37,07	78,47	100,00	Altíssima	Média	Alta
Encoder/ Correia e polias	a43	40	100,00	20	33,33	46,34	100,00	95,06	Baixa	Baixa	Baixa
Drive AC	a44	80	100,00	100	33,33	55,60	28,91	100,00	Altíssima	Altíssima	Alta
Chave seccionadora	a45	80	26,13	40	33,33	9,27	100,00	86,58	Média	Baixa	Alta
Cilindro Dry Roller	a46	80	100,00	60	33,33	92,67	100,00	100,00	Alta	Baixa	Alta
Correias/ Polias	a47	20	100,00	40	33,33	37,07	99,12	35,34	Baixa	Baixa	Baixa
Filtro de Ar	a48	20	24,36	20	66,66	9,27	9,91	25,62	Baixa	Baixa	Baixa
Componentes eletromecânicas	a49	60	100,00	60	33,33	37,07	100,00	31,80	Média	Baixa	Baixa
Ventiladores	a50	20	38,97	40	33,33	14,83	100,00	9,89	Baixa	Baixa	Baixa
Galvanômetros	a51	20	21,60	20	33,33	9,27	100,00	20,67	Baixa	Baixa	Baixa
Conexões elétricas	a52	60	34,55	60	33,33	14,83	100,00	29,68	Média	Baixa	Baixa
Pinça (Castanha)	a53	80	100,00	40	33,33	46,34	100,00	36,22	Média	Baixa	Alta
Freio Pneumático/ disco / Pantilhas	a54	60	100,00	40	33,33	46,34	78,47	18,55	Média	Média	Baixa
Válvulas Pneumáticas	a55	60	34,55	40	33,33	14,83	18,17	15,55	Média	Alta	Baixa
Mangueiras e conexões	a56	20	34,55	20	33,33	14,83	100,00	29,68	Baixa	Baixa	Baixa
Guias lineares	a57	40	100,00	40	33,33	46,34	100,00	100,00	Média	Baixa	Baixa
Fusos / buchas	a58	40	100,00	40	33,33	64,87	100,00	68,91	Média	Baixa	Baixa
Motor DC	a59	80	100,00	100	33,33	46,34	33,04	100,00	Altíssima	Altíssima	Alta
Dive DC	a60	60	100,00	80	33,33	53,69	100,00	100,00	Alta	Baixa	Alta
Coletor/Escovas	a61	100	100,00	80	33,33	80,53	73,46	100,00	Altíssima	Média	Alta
Taco gerador	a62	20	69,50	40	33,33	26,84	27,06	15,71	Baixa	Média	Baixa

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Cabos e conexões elétricas	a63	100	37,07	80	33,33	14,32	100,00	100,00	Média	Baixa	Alta
Ventilação do motor DC	a64	60	37,07	60	33,33	14,32	100,00	9,26	Baixa	Baixa	Baixa
Caixa de conexões elétricas	a65	60	37,07	60	33,33	14,32	34,80	27,79	Média	Alta	Baixa
Indutores Filtros	a66	20	23,17	40	33,33	8,95	92,79	34,73	Baixa	Baixa	Baixa
Redutor	a67	100	100,00	80	33,33	62,64	100,00	100,00	Altíssima	Baixa	Alta
Corrente/ Polia/ Acoplamento	a68	100	100,00	80	100	62,64	100,00	97,59	Altíssima	Baixa	Alta
Transmissão da pinça	a69	60	92,67	60	33,33	35,79	100,00	99,24	Alta	Baixa	Baixa
Base de fixação	a70	100	100,00	80	100	71,59	100,00	100,00	Altíssima	Baixa	Alta
Rolamento	a71	40	100,00	60	33,33	44,74	100,00	17,37	Média	Baixa	Baixa
Motor DC	a72	80	100,00	100	33,33	44,74	30,93	100,00	Altíssima	Altíssima	Alta
Drive	a73	60	100,00	60	33,33	53,69	100,00	100,00	Alta	Baixa	Baixa
Taco Gerador	a74	20	64,88	40	33,33	26,84	27,06	15,71	Baixa	Média	Baixa
Link	a75	60	100,00	60	33,33	44,74	27,06	94,28	Alta	Alta	Média
Ventilação do motor DC	a76	60	41,34	60	33,33	14,32	100,00	9,26	Baixa	Baixa	Baixa
Cabos e conexões	a77	60	41,34	60	33,33	14,32	30,93	27,79	Média	Alta	Baixa
Indutores	a78	20	77,52	40	33,33	26,84	92,79	76,42	Baixa	Baixa	Baixa
Processamento do drive	a79	60	100,00	60	33,33	44,74	69,59	4,14	Média	Média	Baixa
Redutor	a80	80	100,00	80	100	44,74	100,00	100,00	Altíssima	Baixa	Alta
Correia sincronizada / Polias/ Acoplamento	a81	20	77,52	40	33,33	26,84	32,48	22,33	Baixa	Média	Baixa
Mancais/ buchas / rolamentos	a82	60	100,00	60	33,33	44,74	100,00	87,66	Alta	Baixa	Baixa
Base de fixação	a83	80	100,00	60	33,33	53,69	100,00	31,43	Alta	Baixa	Alta

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Acoplamento	a84	20	77,52	40	33,33	26,84	100,00	32,25	Baixa	Baixa	Baixa
Célula de carga	a85	60	100,00	60	33,33	41,68	32,48	100,00	Alta	Alta	Média
Conversor/ Transdutor	a86	20	41,34	40	33,33	13,34	100,00	74,10	Baixa	Baixa	Baixa
Link/ Processamento	a87	40	100,00	60	33,33	41,68	69,59	4,14	Média	Média	Baixa
Sensor indutivos de posição do NIP	a88	20	77,52	40	33,33	25,01	71,91	22,33	Baixa	Baixa	Baixa
Base das células de carga	a89	20	57,81	20	33,33	20,01	100,00	25,14	Baixa	Baixa	Baixa
Mancais/ Rolamentos / Buchas	a90	60	57,81	60	33,33	20,01	27,06	35,06	Alta	Alta	Baixa
Cilindro NIP	a91	60	48,18	60	33,33	16,67	8,51	100,00	Alta	Alta	Média
Mangueiras/ válvulas/ Conexões	a92	20	51,68	40	33,33	16,67	100,00	28,12	Baixa	Baixa	Baixa
Indicador de pressão	a93	40	51,45	100	66,66	20,01	100,00	33,74	Média	Baixa	Alta
Regulador de pressão/ Manómetros	a94	40	36,80	100	66,66	13,34	100,00	33,08	Média	Baixa	Alta
Cilindros pneumáticos	a95	20	68,99	40	33,33	25,01	96,66	32,25	Baixa	Baixa	Baixa
Motor AC	a96	60	91,99	60	33,33	33,34	73,46	100,00	Alta	Média	Baixa
Drive AC	a97	60	100,00	60	33,33	50,02	100,00	100,00	Alta	Baixa	Baixa
Encoder	a98	40	100,00	40	33,33	41,68	100,00	61,20	Média	Baixa	Baixa
Cabos / conexões	a99	60	36,80	60	33,33	13,34	30,93	27,79	Média	Alta	Baixa
Ventilação	a100	20	36,80	40	33,33	13,34	100,00	9,26	Baixa	Baixa	Baixa
Dissipador de energia (Resistor)	a101	60	23,00	40	33,33	8,34	100,00	4,14	Baixa	Baixa	Baixa
Rede Profibus / Placas de comunicação	a102	40	100,00	60	33,33	41,68	27,06	94,28	Média	Alta	Média
Fusíveis	a103	20	21,44	40	33,33	8,34	62,81	24,82	Baixa	Baixa	Baixa
Contator	a104	20	23,00	40	33,33	8,34	29,56	8,38	Baixa	Baixa	Baixa

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Cilindro POP	a105	100	100,00	80	33,33	100,03	100,00	100,00	Altíssima	Baixa	Alta
Redutor	a106	80	100,00	60	33,33	91,70	100,00	100,00	Alta	Baixa	Alta
Correia / Polia	a107	80	100,00	60	33,33	66,69	100,00	34,77	Alta	Baixa	Alta
Mancais / Rolamento	a108	80	100,00	60	33,33	75,03	100,00	100,00	Alta	Baixa	Alta
Base fixação	a109	40	100,00	60	33,33	50,02	100,00	23,71	Média	Baixa	Baixa
Cilindro contra pressão	a110	80	100,00	100	33,33	41,68	36,95	100,00	Altíssima	Altíssima	Alta
Bailarino	a111	60	92,67	80	33,33	33,34	100,00	100,00	Alta	Baixa	Alta
Valvula Proporcional	a112	20	37,07	40	33,33	13,34	16,26	97,36	Baixa	Média	Média
Transdutor de pressão	a113	20	51,83	40	33,33	20,01	100,00	32,24	Baixa	Baixa	Baixa
Sensor Indutivo analógico	a114	40	100,00	60	33,33	41,68	44,34	45,05	Média	Média	Baixa
Placa analógica S7 I/O	a115	20	92,67	40	33,33	33,34	44,34	44,26	Baixa	Média	Baixa
Atuador Pneumático	a116	80	92,67	60	33,33	33,34	16,84	32,74	Alta	Altíssima	Alta
Articulações/ Bucha/ Rolamento	a117	60	100,00	60	33,33	41,68	100,00	46,65	Média	Baixa	Baixa
Processamento S7	a118	40	100,00	60	33,33	41,68	68,87	63,02	Média	Média	Baixa
Válvulas/ mangueiras/ conexões	a119	20	43,19	40	33,33	16,67	34,44	27,83	Baixa	Média	Baixa
motor AC	a120	60	92,67	60	33,33	33,34	30,61	91,67	Alta	Alta	Média
Drive	a121	60	100,00	60	33,33	50,02	100,00	100,00	Alta	Baixa	Baixa
Placa de comunicação Profibus	a122	40	100,00	60	33,33	41,68	26,78	93,30	Média	Alta	Média
Articulação Braço	a123	40	43,19	60	33,33	16,67	91,83	44,20	Média	Baixa	Baixa
Correia / Polia transmissão/ Polia contato	a124	20	43,19	40	33,33	17,90	100,00	34,38	Baixa	Baixa	Baixa
Mangueiras / válvulas / conexões	a125	60	34,55	60	33,33	14,32	100,00	27,50	Média	Baixa	Baixa

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Cilindros Pneumáticos	a126	20	69,50	40	33,33	26,84	95,66	31,92	Baixa	Baixa	Baixa
Guias Eixos	a127	60	100,00	60	33,33	44,74	100,00	100,00	Alta	Baixa	Baixa
Válvula Proporcional Hidráulica	a128	40	42,11	60	100	14,32	100,00	100,00	Média	Baixa	Baixa
Cilindros hidráulicos	a129	80	100,00	80	100	53,69	8,42	100,00	Altíssima	Altíssima	Alta
Conexões / mangueiras hidráulicas	a130	80	10,53	80	100	3,58	15,31	29,79	Baixa	Alta	Alta
Articulação/ buchas	a131	60	100,00	60	33,33	44,74	26,78	46,65	Alta	Alta	Baixa
Bomba hidráulica	a132	80	100,00	40	100	35,79	100,00	100,00	Média	Baixa	Alta
Valvula direcional	a133	40	39,26	60	100	14,32	100,00	86,43	Média	Baixa	Baixa
Válvula Proporcional Hidráulica	a134	40	42,11	60	100	14,32	100,00	100,00	Média	Baixa	Baixa
Válvula direcional	a135	40	39,26	60	100	14,32	100,00	86,43	Média	Baixa	Baixa
Cilindro Hidráulico	a136	80	100,00	40	100	47,11	95,66	100,00	Média	Baixa	Alta
Mangueiras/ conexões	a137	60	24,54	40	33,33	9,42	100,00	30,28	Baixa	Baixa	Baixa
Bomba hidráulica	a138	80	100,00	40	100	37,69	100,00	100,00	Média	Baixa	Alta
Correias Sincronizadas	a139	60	78,96	60	33,33	28,27	100,00	100,00	Alta	Baixa	Baixa
Polias/ Rolamentos	a140	20	100,00	40	33,33	37,69	68,87	42,56	Baixa	Baixa	Baixa
Guias	a141	40	100,00	60	33,33	47,11	100,00	100,00	Média	Baixa	Baixa
Camaras / válvulas do eixo	a142	100	39,26	80	33,33	15,08	9,95	39,29	Média	Altíssima	Alta
Mancais/ Rolamento	a143	60	100,00	60	33,33	47,11	100,00	33,56	Média	Baixa	Baixa
Inflador	a144	60	24,54	40	33,33	9,42	7,65	33,56	Média	Média	Baixa
Mangueiras e conexões	a145	60	21,35	40	33,33	8,20	34,44	30,28	Média	Média	Baixa

Componentes	Alternativa	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	Classificação ELECTRE TRI	RPN	Classificação ABC
Ponteira do inflador	a146	60	21,35	40	33,33	8,20	7,65	33,56	Média	Média	Baixa
Sensor indutivo	a147	20	45,80	40	33,33	16,40	11,48	14,73	Baixa	Média	Baixa
Pressostato	a148	20	36,64	40	33,33	13,12	95,66	32,74	Baixa	Baixa	Baixa
Válvula direcional	a149	20	34,16	40	33,33	13,12	100,00	14,40	Baixa	Baixa	Baixa
CPU S7/ Processamento	a150	40	100,00	60	33,33	40,99	68,87	100,00	Média	Média	Baixa
CPU 342 Profibus	a151	40	100,00	60	33,33	40,99	26,78	100,00	Média	Alta	Média
Conexões elétricas	a152	20	21,35	40	33,33	8,20	100,00	30,28	Baixa	Baixa	Baixa
Rede Profibus/ cabos e terminações	a153	60	100,00	60	33,33	40,99	26,78	42,07	Alta	Alta	Baixa

Apêndice D – Utilização Software ELECTRE TRI 2.0a

A versão 2.0a ELECTRE TRI Software é desenvolvido com a linguagem de programação C ++ com utilização da interface do Microsoft Windows. Os requisitos de hardware e software são os seguintes:

- Computador compatível IBM-PC com mínimo de 16 Mb de RAM;
- Windows 95 ou maior;

O Software ELECTRE TRI 2.0a foi desenvolvido através de uma colaboração de duas equipes:

- Laboratório LAMSADE – Da Universidade de Paris-Dauphine, França;
- Instituto de Computação Science – Poznan University of Technology, Poznan, Polónia.

O download do software pode ser realizado no link:

- <http://www.lamsade.dauphine.fr/~mayag/links.html>

O manual do software é disponibilizado no link:

- <http://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/PDF/mous3docl99.pdf>

Ao entrar no software o usuário deverá escolher um novo projeto, o qual será editado através da janela (*data set*) apresentada na figura abaixo:

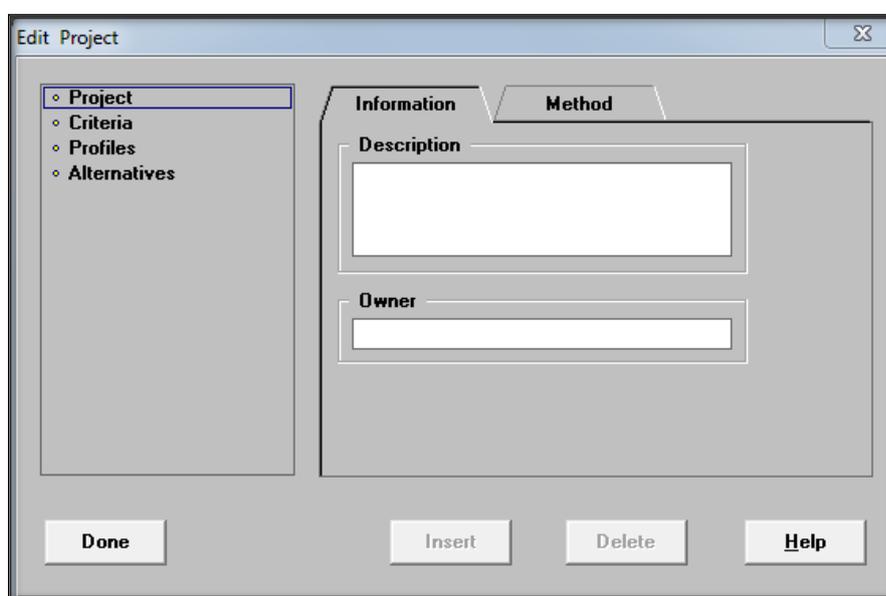


Figura – Janela de modelagem (*data set*)

Esta janela apresenta os seguintes tópicos:

- **CRITERIA** – permite a inclusão e modelagem dos critérios (descrição, peso, sentido de preferência e desempenho mediante as alternativas);
- **PROFILES** – permite a inclusão de perfis limites entre as categorias propostas. Para cada perfil adicionado é criada uma nova categoria. Ao selecionarmos um perfil dentro do tópico, podemos alterar os valores limites de cada critério, limiares de indiferença, preferência e veto para o critério selecionado.
- **ALTERNATIVES** – Neste tópico podemos realizar a inclusão das alternativas que compõem o problema. Ao selecionarmos qualquer alternativa pode-se alterar o seu desempenho para todos os critérios.

A inclusão de alternativas e toda a modelagem do problema pode ser realizada de duas formas:

- Manualmente pela janela de edição (data set);
- Ou importar os dados através de um arquivo (*.txt) editado através de uma planilha eletrônica ou editor de texto;

O procedimento para importar dados em formato de texto encontra-se descrito no manual do software. O resultado do ELECTRE TRI pode ser visualizado através da aba “RESULTS”, sendo disponível as seguintes forma de visualização:

Alocação por categoria:

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
Classe A	A105	A01
Classe B		A04
Classe C		A14
Classe D		A32
		A37
		A42
		A44
		A59
		A61
		A63
		A67

Cutting Level: 0.75

Figura – Visualização do resultado por categoria

Alocação por alternativa:

Alternative Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
A01	Classe C	Classe A
A02	Classe C	Classe B
A03	Classe B	Classe B
A04	Classe C	Classe A
A05	Classe D	Classe C
A06	Classe B	Classe B
A07	Classe D	Classe B
A08	Classe D	Classe C
A09	Classe D	Classe D
A10	Classe C	Classe B
A11	Classe C	Classe B

Cutting Level: 0.75

Figura – Visualização da classificação de cada alternativa

O software ainda disponibiliza os seguintes recursos:

- Comparação dos Perfis:

	A2/A1	A3/A2	A4/A3
A01	>	R	R
A02	>	R	<
A03	>	I	<
A04	>	R	R
A05	R	<	<
A06	>	I	<
A07	R	R	<
A08	R	<	<
A09	<	<	<
A10	>	R	<
A11	>	R	<
A12	>	<	<

Figura – Comparação entre perfis

- Graus de Credibilidade:

	A2/A1	A3/A2	A4/A3
A01	0.910	0.710	0.650
	0.266	0.350	0.680
A02	0.910	0.260	0.260
	0.740	0.740	0.846
A03	0.910	0.850	0.060
	0.150	0.931	0.940
A04	0.850	0.650	0.590
	0.275	0.410	0.670
A05	0.643	0.330	0.000
	0.670	1.000	1.000
A06	0.892	0.850	0.060
	0.150	0.931	0.940

Figura – Graus de credibilidade para cada alternativa

- Visualização do perfil para cada alternativa:

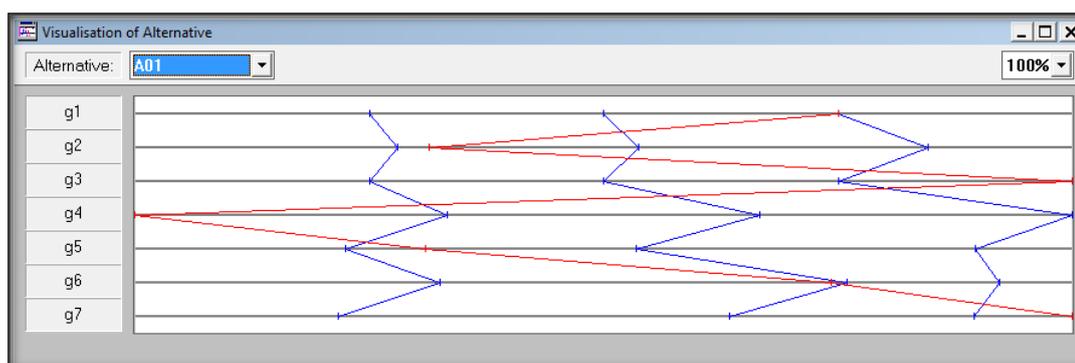


Figura – Visualização da fronteira de cada alternativa

- Estatística da aplicação:

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
Classe A	1 % [1 of 153]	12 % [19 of 153]
Classe B	8 % [12 of 153]	16 % [24 of 153]
Classe C	44 % [68 of 153]	44 % [67 of 153]
Classe D	47 % [72 of 153]	28 % [43 of 153]

Cutting Level: 0.75

Figura – Estatística dos resultados

Apêndice E – Utilização Software Visual PROMETHEE

O software Visual PROMETHEE é baseado nos métodos Promethee e Gaia que foram desenvolvidos nas Universidades ULB e VUB de Bruxelas e têm sido amplamente utilizados em todo o mundo em muitas decisões diferentes ou problemas de avaliação.

A versão Acadêmica do software pode ser obtida no link:

- <http://www.promethee-gaia.net/software.html>
- ou através do e-mail: bmaresc@ulb.ac.be.

O manual do software é disponibilizado no link:

- <http://www.promethee-gaia.net/files/VPManual.pdf>

A versão acadêmica é totalmente funcional sem qualquer restrição. Ela está disponível gratuitamente para pesquisa e ensino sem fins lucrativos. Isto inclui, mas não está limitado a:

- Ph.D. estudantes trabalho de tese.
- Trabalho de pesquisa sem fins lucrativos feito em instituições acadêmicas e centros de pesquisa.
- Apoio claro sem fins lucrativos.

Ao entrar no software o usuário tem a opção de criar um novo problema, onde deve escolher o número de alternativas, número de critérios e número de cenários para a aplicação.

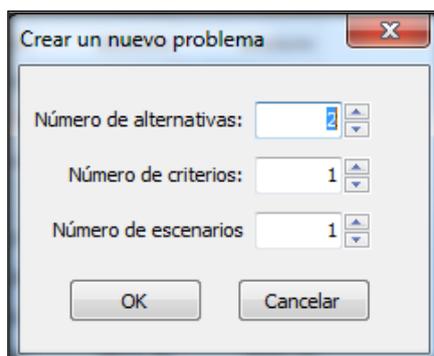


Figura – Janela inicial

Após definir o problema, o software apresenta a tela principal, apresentada na figura abaixo. Nesta tela o usuário pode realizar a modelagem de preferências para o problema, com base nos critérios e alternativas estabelecidas.

A tela principal apresenta as seguintes abas:

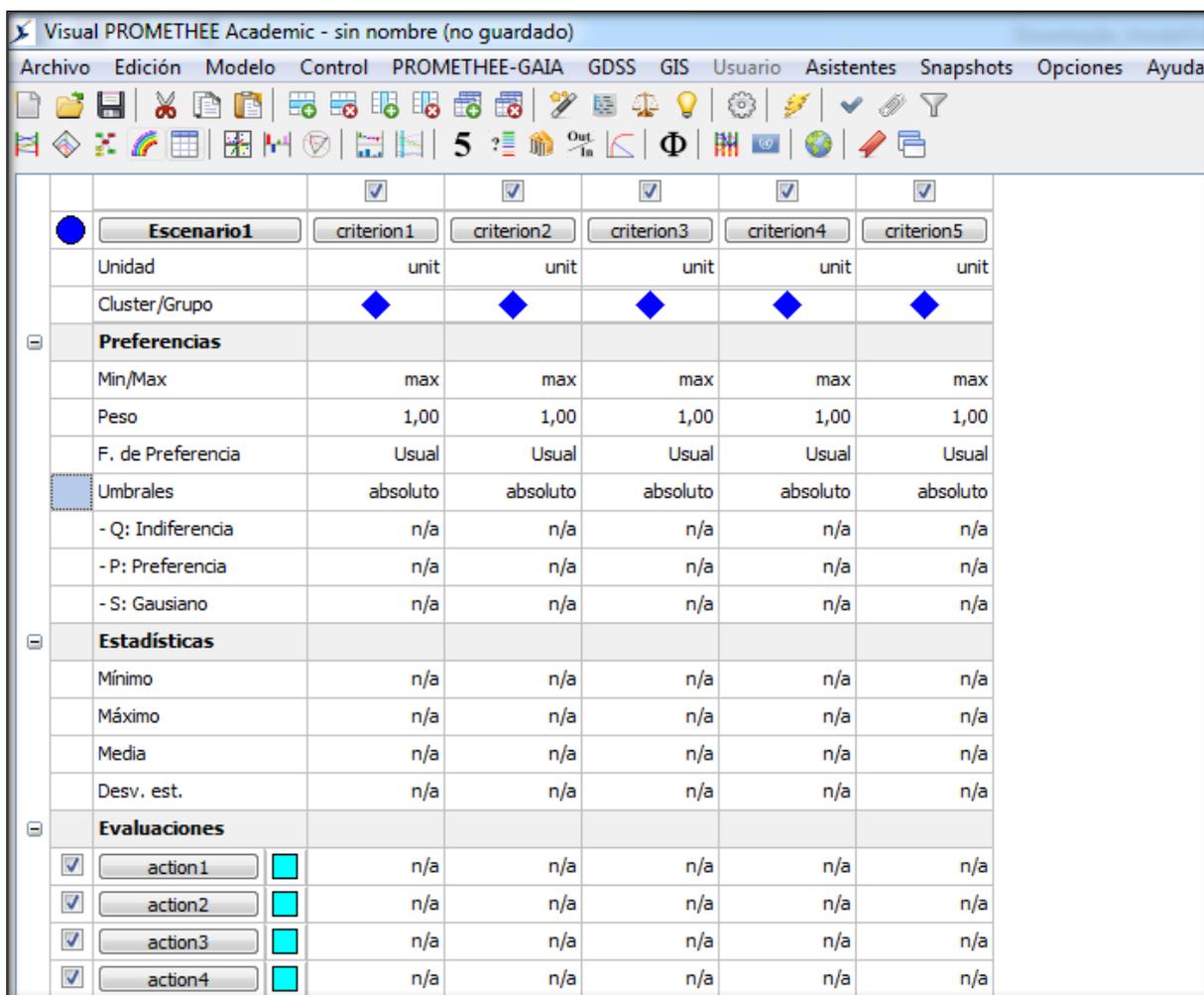


Figura – Janela principal do software

- Preferências: permite realizar a modelagem de preferências, sentido de preferência (maximizar/minimizar), definir pesos dos critérios, escolha da função de preferência, limites, limites de indiferença, preferência e gaussiano;
- Estatísticas: visualização de algumas propriedades estatísticas dos dados tabulados (mínimo, máximo, mediana, média, desvio);
- Avaliações: permite realizar a avaliação de cada alternativa para todos os critérios;

Ainda na tela principal é possível descrever e atribuir características de todos os critérios avaliados.

A modelagem do problema pode ser realizada de duas formas:

- Manualmente pela janela principal;

- Ou importar os dados através de uma planilha eletrônica ou arquivo de texto, formatadas conforme especificado pelo software. (maiores informações sobre como importar a modelagem podem ser obtidas no manual);

O *software* apresenta uma ferramenta de assistência que auxilia na modelagem dos critérios (função de preferência, pesos e limiares) com base nos dados inseridos pelo usuário.

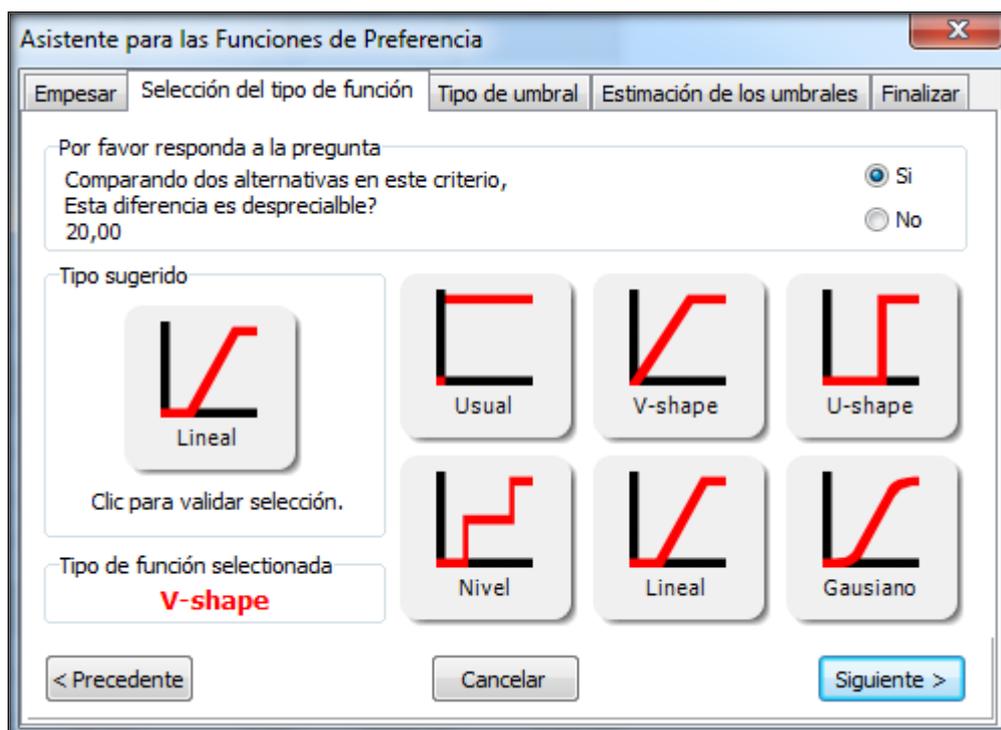


Figura – Assistente para modelagem do problema

Estão disponíveis as seguintes análises:

- *PROMETHEE I Partial Ranking*: Ordenação parcial baseada no fluxo de saída (Φ^+), e fluxo de entrada (Φ^-);
- *PROMETHEE II Complete Ranking*: Ordenação completa baseada no fluxo líquido (Φ). A metade da escala superior (verde) corresponde aos fluxos líquidos positivos, e a metade inferior (vermelha) aos fluxos negativos;

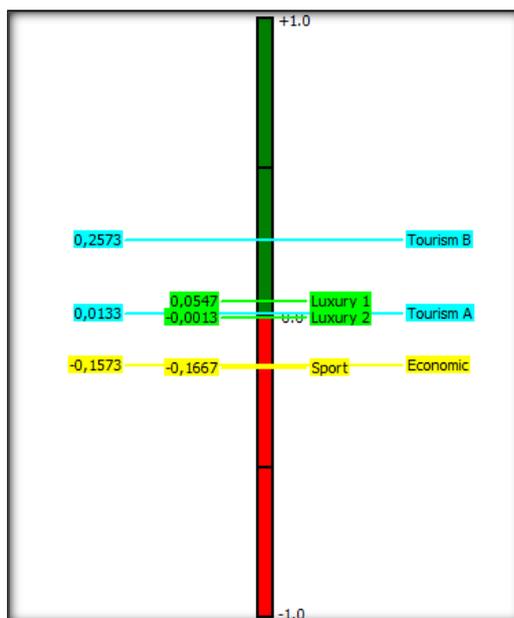


Figura – Visualização do resultado do PROMETHEE II

- *PROMETHEE DIAMOND*: permite a visualização de cada alternativa (ϕ) em um plano de 45° bi-dimensional;
- *PROMETHEE Network*: Visualização alternativa do PROMETHEE I;
- *PROMETHEE Rainbow*: Visualização desagregada do PROMETHEE II que enfatiza as características boas e fracas de cada alternativa;
- PROMETHEE Table: Tabela com resultado da ordenação completa (PROMETHEE II);
- GAIA analysis: Visualização do resultado com análise GAIA;
- Action Profile: representação gráfica do perfil de preferência do fluxo líquido de cada critério para uma determinada alternativa;

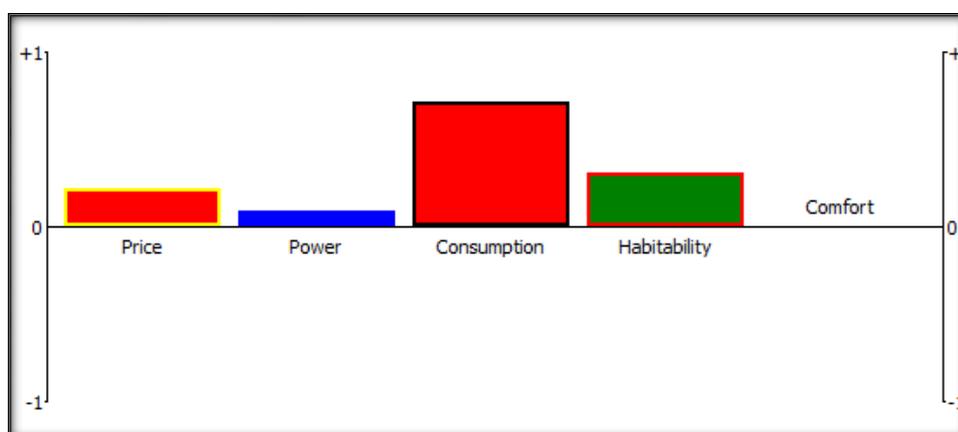


Figura – Perfil líquido de cada alternativa

- *GAIA Web*: apresenta uma visualização gráfica da preferência do fluxo líquido para cada critério de uma determinada alternativa;
- *Walking Weights*: Permite alterar o peso de cada critério e verificar o resultado sobre a análise;
- *Visual Stability Intervals*: Visualização gráfica alternativa para realizar análise de sensibilidade para determinado critério;
- *PROMETHE V*: Aplicação do método de seleção PROMETHE V;
- *PROMETHEE Sort*: extensão dos métodos PROMETHEE para ordenação das alternativas em classes pré-definidas;
- *Performance Analysis*: Avaliação de desempenho para um conjunto de unidades em razão de vários critérios de entrada e saída. Ele ainda está em uma fase de desenvolvimento de pesquisa e destina-se como uma alternativa aos métodos, tais como: Análise Envoltória de Dados (DEA).
- *Preference Flows*: Permite visualiza o fluxo líquido de preferência de duas formas. Unicritério e Multicritperio.