

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

MARIANA LOSADA AGUDELO

**Modelo Multicritério para Priorização de Modos de Falha em**  
**Plantas Industriais Usando Manutenção Centrada em**  
**Confiabilidade**

Recife, 2017

MARIANA LOSADA AGUDELO

**Modelo Multicritério para Priorização de Modos de Falha em  
Plantas Industriais Usando Manutenção Centrada em  
Confiabilidade**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

**Área de concentração:** Pesquisa Operacional

**Orientador:** Prof. Adiel Teixeira de Almeida, *PhD*

Recife, 2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A282m Agudelo, Mariana Losada.  
Modelo multicritério para priorização de modos de falha em plantas industriais usando manutenção centrada em confiabilidade / Mariana Losada Agudelo. – 2017.  
93 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.  
Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. MAUT. 3. Decisão Multicritério. 4. RCM. 5. Manutenção. I. Almeida, Adiel Teixeira de. (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-141

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORAPARECER DA COMISSÃO  
EXAMINADORAPARECER DA COMISSÃO EXAMINADORAPARECER  
DA COMISSÃO EXAMINADORADA COMISSÃO EXAMINADORA**

**DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE**

**MARIANA LOSADA AGUDELO**

**“Modelo Multicritério para Priorização de Modos de Falha em Plantas  
Industriais Usando Manutenção Centrada em Confiabilidade”**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL**

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **MARIANA LOSADA AGUDELO, APROVADA.**

Recife, 23 de Fevereiro de 2017

---

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, Doutor (UFPE), Orientador

---

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

---

Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

## **AGRADECIMENTOS**

No final de um trabalho árduo chega o momento de refletir e lembrar das pessoas e instituições que contribuíram para que este trabalho fosse possível. Por isso é um verdadeiro prazer usar este espaço para expressar meus agradecimentos para todos eles.

Aos meus Familiares (meu pai Diego, minha mãe Flor, minha irmã Liliana, meu sobrinho que contribuíram de forma positiva), que desde a distância derem um apoio incessante durante esta etapa da minha vida. Ao meu Orientador Prof. Marcelo Hazin Alencar e ao professor Adiel Teixeira de Almeirda, que guiaram ao longo deste mestrado e mostraram ser uma fonte de conhecimento necessária para me auxiliar neste mestrado. A toda equipe do PPGE. Aos amigos, que ainda desde a distância, estiverem sempre nos momentos difíceis e compartilhara daqueles momentos alegres e aos novos adquiridos, que me ajudarem e acompanharem durante o tempo longe de casa e agora considero eles minha família no Brasil.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro.

*“Não esqueça que o que chamamos hoje realidade foi imaginação ontem”*

**José Saramago**

## RESUMO

Devido ao rápido incremento dos avanços tecnológicos que tem melhorado diferentes aspectos da sociedade, tem-se uma maior exigência para as indústrias, pois cada dia os consumidores pedem maior qualidade e melhores tempos de atendimento. Nestes sentido as organizações em procura de melhorar seus processos devem tomar decisões muitas vezes conflitantes que acarretam consequências para a organização e para a sociedade em geral.

Este trabalho apresenta a aplicação de um modelo de decisão multicritério baseado na teoria utilidade multiatributo MAUT integrado com a abordagem de manutenção centrada em confiabilidade conhecido como RCM (Reliability-Centered Maintenance), este modelo será aplicado na priorização de modos de falha em plantas industriais. O modelo permite uma avaliação quantitativa das consequências dos modos de falha incorporando as preferencias do decisor (gerente de manutenção). Desta forma, é proporcionada informação para a tomada de decisão para o planejamento da manutenção.

Com a aplicação do modelo, procura-se evidenciar sua funcionalidade na priorização e planejamento da manutenção em diferentes plantas industriais, considerando as consequências dos modos de falha em cinco dimensões (humana, ambiental, financeira, operacional com interrupção dos processos, operacional sem interrupção dos processos), contribuindo na melhora da estruturação das decisões relacionadas à manutenção, que podem contribuir na melhora da qualidade e atendimento final para a sociedade.

*Palavras Chave: MAUT. Decisão Multicriterio. RCM. Manutenção.*

## ABSTRACT

With the rapid increase in technological breakthroughs that have improved different aspects of society, the industries have a greater challenge, as each day consumers demand higher quality and better service times. In this sense, the organizations seeking to improve their processes must take decisions are often conflicting and with consequences for the organization and for the society.

According to the above, this paper presents the application of a multicriteria decision model based on the MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) integrated with the Reliability-Centered Maintenance (RCM) approach, this model will be applied in the prioritization of failure modes in industrial plants. The model allows a quantitative evaluation of the consequences of failure modes incorporating the preferences of the decision maker (maintenance manager). In this way, information is provided for decision making in maintenance planning.

With the application of the model, we tried to evidence its functionality in the prioritization and planning of maintenance in different industrial plants, considering the consequences of failure modes in five dimensions (human, environmental, financial, operational with interruption of processes, operational without interruption of processes), contributing to the improvement of structuring decisions related to maintenance, which can contribute to the improvement of quality and final service to society.

*Keyword: MAUT. Multicriteria decision making. RCM. Maintenance.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Características únicas do RCM .....	21
Figura 2.2 Metas do RCM .....	22
Figura 3.1 Procedimento RCM.....	28
Figura 3.2 Procedimento RCM aplicando o modelo multicriterio proposto.....	29
Figura 3.3 Procedimento para resolução de um problema de decisão .....	30
Figura 3.4 Variacção análise de sensibilidade .....	47
Figura 3.5 Variação análise de sensibilidade-cenário.....	58
Figura 3.6 Variacção análise de sensibilidade .....	67
Figura 3.7 Variacção análise de sensibilidade .....	81
Figura 3.7 Gráfico de variação de posição, Caso 1 .....	83
Figura 3.8 Gráfico de variação de posição, Caso 2 .....	83
Figura 3.10 Gráfico de variação de posição, Caso 3 .....	84
Figura 3.11 Gráfico de variação de posição, Caso 4 .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Escala para avaliação de ocorrência .....	38
Tabela 3.2- Escala para avaliação de detectabilidade .....	38
Tabela 3.3- Escala para avaliação de severidade .....	39
Tabela 3.4- Ranking da criticidade dos modos de falha avaliados com o RCM .....	39
Tabela 3.5- Componentes, modos de falha e probabilidades de ocorrência .....	40
Tabela 3.6- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana .....	41
Tabela 3.7- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental .....	41
Tabela 3.8- Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira .....	42
Tabela 3.9- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação .....	43
Tabela 3.10- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas na operação .....	43
Tabela 3.11- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha.....	44
Tabela 3.12- Ranking dos valores da função utilidades multiatributo para cada modo de falha .....	45
Tabela 3.13- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha .....	45
Tabela 3.14- Escala para avaliação de ocorrência .....	48
Tabela 3.15- Escala para avaliação de detectabilidade .....	48
Tabela 3.16- Escala para avaliação de Severidade .....	48
Tabela 3.17- Ranking da criticidade dos modos de falha utilizando o método RCM.....	49
Tabela 3.18- Componentes, modos de falha e probabilidades de ocorrência .....	50
Tabela 3.19- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana .....	51
Tabela 3.20- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental .....	52
Tabela 3.21- Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira .....	52
Tabela 3.22- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação .....	53
Tabela 3.23- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas na operação .....	54
Tabela 3.24- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha.....	55
Tabela 3.25- Ranking dos valores da função utilidades multiatributo para cada modo de falha .....	56
Tabela 3.26- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha .....	57
Tabela 3.27- Escala para avaliação de Ocorrência .....	59
Tabela 3.28- Escala para avaliação de Detectabilidae .....	59
Tabela 3.29- Escala para avaliação de Severidade .....	59
Tabela 3.30- Ranking da criticidade dos modos de falha utilizando o método RCM.....	60
Tabela 3.31- Modos de falha e probabilidades de ocorrência .....	61
Tabela 3.32- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana .....	62
Tabela 3.33- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental .....	62
Tabela 3.34-Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira .....	63
Tabela 3.35- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação .....	64
Tabela 3.36- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação .....	64
Tabela 3.37- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha.....	65
Tabela 3.38- Ranking dos valores da função multiatributo para cada modo de falha .....	66

Tabela 3.39- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha .....	66
Tabela 3.40- Escala para avaliação de Ocorrência .....	68
Tabela 3.41- Escala para avaliação de Detectabilidade .....	69
Tabela 3.42- Escala para avaliação de Severidade .....	70
Tabela 3.43- Ranking da criticidade dos modos de falha utilizando o método RCM.....	70
Tabela 3.44- Modos de falha e probabilidades de ocorrência .....	72
Tabela 3.45- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana .....	73
Tabela 3.46- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental .....	74
Tabela 3.47-Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira .....	75
Tabela 3.48- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação .....	76
Tabela 3.49- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação .....	77
Tabela 3.50- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha.....	78
Tabela 3.51- Ranking dos valores da função multiatributo para cada modo de falha .....	79
Tabela 3.52- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha .....	80

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 .....	32
Equação 3.2 .....	33
Equação 3.3 .....	33
Equação 3.4 .....	34
Equação 3.5 .....	34
Equação 3.6 .....	35
Equação 3.7 .....	35
Equação 3.8 .....	41
Equação 3.9 .....	41
Equação 3.10 .....	42
Equação 3.11 .....	43
Equação 3.12 .....	43
Equação 3.13 .....	50
Equação 3.14 .....	51
Equação 3.15 .....	52
Equação 3.16 .....	53
Equação 3.17 .....	54
Equação 3.18 .....	61
Equação 3.19 .....	62
Equação 3.20 .....	63
Equação 3.21 .....	63
Equação 3.22 .....	73
Equação 3.23 .....	74
Equação 3.24 .....	75
Equação 3.25 .....	76

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1.1	Decisão Multicritério .....	18
2.1.1.1	<i>Classificação dos métodos multicritério</i> .....	19
2.1.1.2	<i>Construção de modelos de apoio à decisão multicritério</i> .....	19
2.1.1.3	<i>Teoria de utilidade Multiatributo – MAUT</i> .....	20
2.1.2	Manutenção Centrada em confiabilidade.....	21
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MÉTODOS MULTICRITÉRIO EM PLANEJAMENTO E PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO.....	23
2.2.1	Métodos multicritério nas estratégias de manutenção.....	24
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE PLANTAS INDUSTRIAIS USANDO RCM</b> .....	<b>27</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO .....	27
3.1.1	Caracterização dos decisores .....	30
3.1.2	Identificação dos objetivos.....	30
3.1.3	Identificação das consequências.....	31
3.1.3.1	<i>Modelagem probabilística.</i> .....	32
3.1.4	Espaço de ações e problemática .....	32
3.1.5	Análises das consequências .....	33
3.1.6	Modelagem de preferencias .....	33
3.1.7	Avaliação intracritério .....	34
3.1.8	Avaliação intercritério .....	35
3.1.9	Avaliação de alternativas .....	36
3.1.10	Análises de sensibilidade.....	36

3.1.11	Analisar resultado e elaborar recomendação.....	36
3.1.12	Implementar decisão .....	37
3.2	APLICAÇÃO DO MODELO .....	37
3.2.1	Aplicação numérica 1 .....	37
3.2.1.1	<i>Análise de sensibilidade</i> .....	46
3.2.2	Aplicação numérica 2 .....	47
3.2.2.1	<i>Análise de sensibilidade</i> .....	57
3.2.3	Aplicação numérica 3 .....	58
3.2.4	Aplicação numérica 4 .....	67
3.3	DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	81
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>87</b>
4.1	CONCLUSÕES .....	87
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	88
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, as empresas têm um novo desafio, o qual consiste em atender às necessidades da sociedade de forma oportuna e com a finalidade de serem competitivas, em um mundo que começa a exigir qualidade e disponibilidade dos bens e serviços que são comercializados. Isto tem ocasionado mudanças nos sistemas de produção.

Nos últimos tempos, a humanidade tem se mostrado dependente das riquezas geradas por empresas altamente mecanizadas e automatizadas; ao mesmo tempo, existe uma dependência de serviços como a eletricidade ou os meios de transporte, que, por sua vez, dependem de uma integração dos ativos físicos. Assim, quando os ativos físicos falham, podem afetar não só as riquezas, mas também a segurança e integridade do ambiente e das pessoas (MOUBRAY,1997).

Com relação às empresas, existem grandes investimentos na aquisição de ativos físicos e espera-se um retorno sobre tais investimentos. Um fato que influencia neste retorno está relacionado com a manutenção dos ativos físicos, desta forma, se é feita uma manutenção efetiva, isto vai repercutir em uma melhora nos benefícios e na produtividade da empresa (PINJALA,2006).

O ambiente competitivo de hoje exige que as indústrias tentem sustentar as capacidades de produção, além de minimizarem o investimento de capital. Do ponto de vista de manutenção, isso envolve maximizar a confiabilidade do equipamento (ou seja, o tempo de funcionamento) incluindo o prolongamento da vida do equipamento.

A manutenção deve ser parte integral das estratégias de negócios das empresas, especialmente pelo fato das mudanças na economia global que exigem que as empresas sejam altamente competitivas para responder às mudanças do mercado (ETI, OGAJI & PROBERT, 2006).

A manutenção também tem mudado nas últimas décadas devido ao aumento no número e na variedade de ativos físicos que precisam ser mantidos. Assim os desafios atuais da manutenção podem ser resumidos na necessidade de escolher técnicas apropriadas para enfrentar cada tipo de falha nos processos para responder às expectativas dos proprietários e usuários dos ativos de forma rentável e durável (MOUBRAY,1997).

Um ponto importante a ser considerado no contexto decisório, incluindo o ambiente da gestão da manutenção é destacado por Almeida *et al.* (2015). Segundo os autores, os problemas

de decisão com uma única função objetivo não há a necessidade de se considerar a estrutura de preferências do decisor, pois assume-se que o decisor é racional e que ele/ela deseja otimizar apenas uma função objetivo. Entretanto, quando outra medida de desempenho é introduzida, através de uma nova função objetivo, o problema se torna mais realístico requerendo que a estrutura de preferências do decisor seja tratada com relação ao trade-off entre os objetivos conflitantes.

Neste sentido, esta pesquisa será aplicada no contexto do gerenciamento da manutenção, levando em consideração as mensurações citadas anteriormente com relação à manutenção e aos impactos que podem ter de forma direta ou indireta em diferentes cenários, implementando-se um modelo de decisão multicritério que permita melhorar o planejamento dos programas de manutenção de acordo com as preferências ou prioridades de um decisor responsável pela tomada de decisão nos programas de manutenção.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As mudanças no mercado e a globalização têm impactado as operações nas indústrias - as exigências atuais são cada vez maiores em relação à qualidade dos produtos, o tempo de entrega e à competitividade dos preços.

Além disso, o que se tem hoje em dia são decisões mais complexas, devido a fatores como: vários atores envolvidos, nível de tecnologia empregado e maior acesso a informação. Tudo isso faz com que as consequências de um processo decisório possam afetar, muitas vezes de forma até catastrófica, diferentes dimensões, impactando, por exemplo, a parte operacional de uma planta industrial, causando danos a pessoas, ao meio ambiente, à imagem da empresa, etc.

Nesse contexto, o planejamento da manutenção de ativos é um item importante no gerenciamento das operações, pois, através da tomada de decisões adequada em cada contexto operacional, pode-se contribuir para a qualidade e, principalmente, para a redução de consequências indesejáveis como é o caso da redução dos custos de operação.

Desta forma, esta pesquisa aplica um modelo multicritério baseado na metodologia RCM (*Reliability Centered Maintenance*), levando em conta a estrutura de preferências do decisor com o intuito de melhorar a gestão da manutenção, baseado nas necessidades e critérios específicos para as indústrias e, desta forma, obtenha vantagens competitivas através do melhoramento da qualidade e produtividade e a redução da chance de ocorrência de eventos indesejáveis.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

Aplicação de um modelo multicritério baseado na abordagem RCM com o intuito de priorizar os modos de falha mais críticos no contexto de gestão da manutenção em plantas industriais, com base na avaliação das consequências das falhas.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

Com a finalidade de alcançar o objetivo geral proposto, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Revisar a literatura relacionada com os conceitos e aplicações da abordagem RCM na indústria;
- Revisar os conceitos e aplicações de métodos multicritério no planejamento da manutenção nas indústrias;
- Selecionar o modelo multicritério para avaliar as consequências dos modos de falha que são obtidas através da abordagem RCM;
- Realizar aplicação numérica do modelo multicritério selecionado com a finalidade de ilustrar os seus resultados práticos;
- Comparar os resultados obtidos quanto a priorização dos modos de falha a partir da aplicação do modelo multicritério e de algumas etapas da abordagem RCM tradicional.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a finalidade de proporcionar melhor compreensão da estrutura deste trabalho, são apresentados os capítulos de forma resumida, esses capítulos são feitos com a finalidade de entender de forma simples como serão alcançados os objetivos propostos.

O Capítulo 1, a Introdução, apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos do estudo.

O Capítulo 2, expõe a fundamentação teórica para o trabalho, está se encontra primeiramente focada nos conceitos de decisão multicritério e sobre o método de manutenção centrada em confiabilidade que serão a base para o desenvolvimento do projeto. Posteriormente, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os métodos multicritérios usados no planejamento e priorização da manutenção.

O Capítulo 3, trata-se da descrição do modelo usado, são demonstradas as etapas do modelo foco desse trabalho, contendo a explicação das variáveis, parâmetros e equações do modelo.

O Capítulo 4, apresenta uma análise dos resultados apresentados no capítulo anterior e expõe as conclusões obtidas neste trabalho e os possíveis trabalhos futuros que podem ser gerados a partir desse.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base conceitual utilizada para este trabalho é apresentada a seguir e consiste na revisão da teoria e definições relacionadas aos modelos de decisão multicritério, Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT- *Multiattribute Utility Theory*), RCM (*Reliability-Centered maintenance*). Seguidamente, é feita uma revisão bibliográfica sobre as aplicações de modelos de tomada de decisão multicritério para o planejamento da manutenção que estão sendo usados.

#### 2.1.1 *Decisão Multicritério*

Apoio à decisão é definido como a atividade de uma pessoa, através do uso de modelos estritos, mas não necessariamente completos, para obter elementos das respostas às perguntas formuladas por *stakeholders* de um processo de decisão (ROY, 1996).

Neste contexto, Zeleny (1982) afirma que a decisão é desenvolvida através de um processo de aprendizagem, compreendendo, processando informação, avaliando e definindo o problema e suas circunstâncias, dando ênfase nos processos, não nas atuações e nem nos resultados da decisão.

Um problema de decisão multicritério consiste numa situação onde há pelo menos duas alternativas de ação para se escolher e esta escolha é conduzida pelo desejo de se atender a múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes entre si. Estas situações são apresentadas em modelos de decisão que utilizam métodos de apoio à decisão (MCDA). A aplicação de qualquer método MCDA pressupõe a necessidade de estabelecer quais objetivos o decisor pretende alcançar. (DE ALMEIDA *et al.*, 2015)

Segundo De Almeida (2013) os métodos multicritério surgiram pela necessidade de resolver problemas de decisão com as seguintes características:

- Pelo menos dois dos critérios de resolução de problema são conflitantes;
- Os critérios e as alternativas de solução não são claramente definidos e as consequências da escolha de uma dada alternativa não são bem compreendidas;
- A solução do problema depende de um conjunto de pessoas, que podem ter objetivos conflitantes;
- Desconhecimento nas restrições do problema;

- Alguns dos critérios são quantificáveis e outros só podem ser avaliados em uma escala de valor qualitativa;

Segundo Belton e Stewart (2002), o principal objetivo e benefício do MCDA é facilitar ao decisor a aprendizagem e entendimento do problema que vai ser enfrentado, estabelecendo suas prioridades, valores e objetivos para identificar as presenças de atuação.

#### 2.1.1.1 Classificação dos métodos multicritério

De acordo com o contexto do problema, os métodos multicritério podem ser divididos em classes, segundo Roy (1996) a divisão é feita em três classes:

- Métodos de agregação em critério único de síntese: São aqueles que realizam uma comparação global de todas as alternativas e têm como resultado final a agregação de todos os objetivos/critérios considerados em um único critério. Nesta classificação se encontram principalmente o método MAUT; o método aditivo; o método SMARTS; o método AHP; o método MACBETH;

- Métodos de sobreclassificação: estão baseados na comparação par a par das alternativas na procura de relações de sobreclassificação. Dentro desta categoria, se encontram os métodos da família ELECTRE e os métodos da família PROMETHEE;

- Métodos iterativos: Fazem referência ao processo constante de interação entre o analista e o decisor durante a construção do modelo e a elicitación de preferências.

#### 2.1.1.2 Construção de modelos de apoio à decisão multicritério

A aplicação de qualquer método de análise multicritério pressupõe a necessidade de se estabelecer que objetivos o decisor pretende alcançar, estabelecendo a representação destes múltiplos objetivos através do uso de critérios ou atributos (DE ALMEIDA *et al*, 2015; DE ALMEIDA, 2013).

Segundo French et al., (1978), o processo de análise de decisão envolve basicamente três etapas;

- Um movimento do mundo real para um conjunto de modelos matemáticos;
- O encontro de soluções nestes modelos;
- Um movimento destas soluções abstratas de volta às operações físicas no mundo real.

Na modelagem de um problema de decisão multicritério deve ser considerado o tipo de problemática que será avaliada, Roy (1996) identifica quatro problemáticas que podem ser envolvidas:

Problemática de escolha ( $\square$ ): procura identificar um subconjunto de ações, tão pequeno quanto possível, a partir de um espaço de ações, composto de alternativas que sejam compatíveis com os objetivos do decisor;

Problemática de classificação ( $\square$ ): a partir de categorias pré-definidas, objetiva-se alocar cada uma das alternativas nessas categorias;

Problemática de ordenação ( $\square$ ): consiste em alocar as alternativas conforme uma ordem de preferência;

Problemática de descrição ( $\square$ ): consiste em descrever formalmente e sistematicamente as ações e suas consequências, podendo ser em termos quantitativos ou qualitativos.

De acordo com De Almeida (2013), no processo de construção do modelo, deve-se observar que a simplicidade do modelo tem um papel muito relevante, embora deve ser sempre confrontada com precisão obtida para o modelo.

#### 2.1.1.3 Teoria de utilidade Multiatributo – MAUT

A teoria da utilidade multi-atributo (MAUT) está intimamente relacionado com a tomada de decisão multicritério e permite a quantificação e agregação de múltiplos objetivos, mesmo quando estes objetivos são compostos por atributos conflitantes, ou quando eles são subjetivos. (DE ALMEIDA & BOHORIS, 1995)

MAUT foi desenvolvido para problemas de decisão multicritério, baseado na teoria de utilidade, onde a abordagem de agregação mais aplicado tem sido o modelo aditivo, para o qual a estrutura axiomática da teoria indica o número de propriedades a ser considerado. Neste método a consequência probabilística é considerada na função utilidade. (de ALMEIDA *et al* 2015)

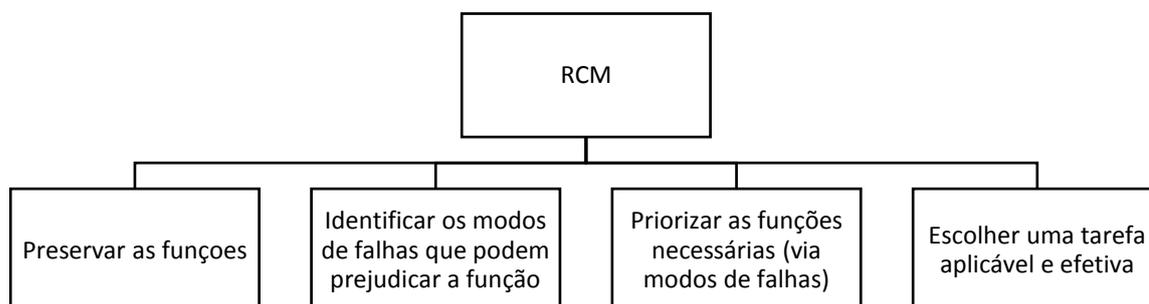
A construção de modelos que utilizam MAUT permitem tratar as incertezas inerentes aos problemas a serem analisados através do uso de conhecimento a priori do especialistas e do sistema de produção (DE ALMEIDA, 2013). Nesses situações, alguns problemas são tratados sob a ótica dos ingredientes básicos da teoria da decisão (BERGER, 1985; KEENEY & RAIFFA, 1976; SOUZA, 2002): Estado da natureza, ações que o decisor pode adotar, consequências. O estado da natureza é avaliado com base na análise estatística dos dados do sistema.

### 2.1.2 Manutenção centrada em confiabilidade

De acordo com Moubray (1997), a abordagem RCM corresponde à ideia de responder às mudanças que a manutenção tem sofrido de forma rápida e simples. É uma maneira eficaz de desenvolver programas de manutenção para novos ativos físicos, especialmente equipamentos complexos, que não tem informação histórica.

Essa abordagem foi desenvolvida para ajudar na elaboração de programas de manutenção para novos tipos de aeronaves antes de que entrem em funcionamento. RCM foi aplicado com sucesso durante mais de 20 anos, primeiro dentro da indústria de aeronaves, mais tarde no seio das forças militares, na indústria nuclear, na indústria de petróleo e gás, entre outras (RAUSAND, 1998).

O RCM pode ser definido como uma abordagem sistemática para a funcionalidade do sistema, falhas desta funcionalidade, causas e efeitos das falhas e a infraestrutura afetada pelas falhas (CARRETERO *et al.*, 2003). Para Deshpande & Modak (2002), o RCM é completamente descrito pelas quatro características apresentadas na Figura 2.1.



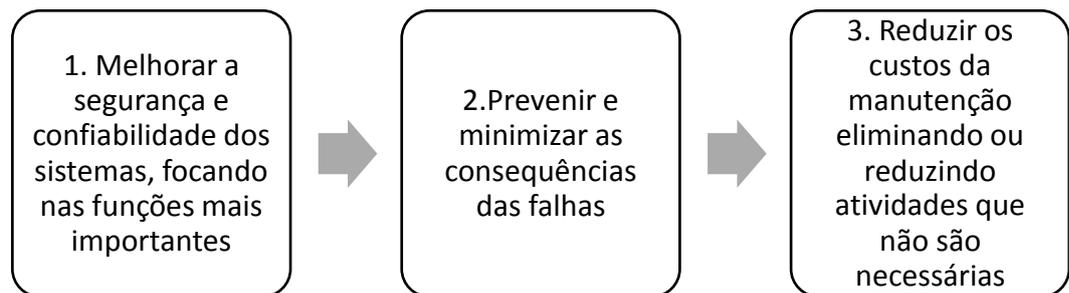
*Figura 2.1 Características únicas do RCM*  
 Fonte: Adaptado Deshpande & Modak, 2002.

Fonseca & Knapp (2000) afirmam que o objetivo central do RCM é a determinação das ações necessárias para garantir que todos os ativos físicos continuem a desempenhar suas funções dentro de seu ambiente operacional.

De acordo com Rausand (1998) afirma que o RCM foi criado para equilibrar os custos e benefícios para obter custos eficientes nos programas de PM (Manutenção preventiva). Por outro lado, para Niu, Yang e Pecht (2010), o RCM é uma abordagem de melhoria industrial focado na identificação e o estabelecimento de políticas operacionais, de manutenção e melhora do capital que gerencia os riscos de falha de equipamento de forma mais eficaz.

Sendo assim, o RCM parte de uma revisão das necessidades de manutenção dos ativos físicos para determinar estratégias apropriadas com os requerimentos de custos da organização. Para Selvik & Aven (2011), o principal objetivo de RCM é a redução dos custos de manutenção e, ao mesmo tempo, o incremento da confiabilidade e da segurança.

Segundo Carretero *et al.*, (2003), o RCM tem três metas que são apresentadas na Figura 2.2.



*Figura 2.2 Metas do RCM*

*Fonte: Adaptado Carretero et al., 2003.*

Segundo Fischer, Besnard e Bertiling (2012), o RCM é um método qualitativo que avalia as diferentes estratégias de manutenção, assegurando esforços de manutenção para o tratamento de componentes e falhas mais relevantes.

De acordo com Moubray (1997) e Deshpande (2002), uma análise RCM responde aos seguintes questionamentos:

- Quais são as funções e padrões de desempenho associados ao equipamento no atual contexto operacional?
- De que modo os equipamentos não cumprem suas funções?
- Qual é a causa de cada falha funcional?
- O que ocorre quando cada falha ocorre?
- Qual a importância de cada falha?
- O que pode ser feito para se prevenir cada falha?
- O que deve ser feito se não for possível desempenhar uma atividade preventiva?

Rausand (1998) afirma que a experiência tem demonstrado que, aproximadamente, 30% dos esforços de uma análise RCM se encontram na definição das funções e padrões de desempenho, correspondendo à primeira função.

## 2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MÉTODOS MULTICRITÉRIO EM PLANEJAMENTO E PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO

A manutenção tem um papel importante para obtenção de uma alta qualidade dos produtos e custos eficientes da operação. Assim, uma maior atenção é necessária em alguns elementos da estratégia da manutenção, como nas modificações da manutenção e nas políticas de recurso humano - a manutenção orientada a equipes, envolvendo os operadores de produção, é crucial para manter a qualidade do produto e reduzir os custos (PINJALA, PINTELON & VEREECKE, 2006).

Devido ao seu papel crítico na produção e fabricação, a seleção de uma política de manutenção adequada é um problema de gerenciamento significativo. Na prática, o problema de seleção da estratégia de manutenção e os critérios envolvidos neste processo são frequentemente associados à incerteza devido ao fato de ser difícil para os decisores determinar a informação numérica exata sobre os critérios. (AZADEH & ZADEH, 2016)

Como consequência, o desafio de estabelecer o modelo ideal para conduzir as atividades de manutenção tornou-se um tema de pesquisa e uma questão fundamental para alcançar eficácia e eficiência da gestão da manutenção, para cumprir os objetivos da empresa. (MISHRA *et al.*, 2015).

De acordo com Scarf e Cavalcante (2012), quando os planejamentos de manutenção são ineficientes podem reduzir o desempenho do sistema, resultando em elevados *downtime*, altos custos e indução de falhas no sistema devido a erros cometidos durante a intervenção de manutenção.

No contexto da manutenção, a tomada de decisão é uma questão estratégica nas organizações para otimizar as estratégias para o planejamento, onde na realidade, um único critério não pode ser considerado para a otimização, fazendo os problemas de decisão multifacetadas e por tanto, requerem vários critérios de decisão. (DE ALMEIDA & CAVALCANTE, 2009)

Os problemas de decisão com múltiplos objetivos podem ser resolvidos usando as seguintes abordagens (DE ALMEIDA, FERREIRA & CAVALCANTE, 2015):

- Método MCDM: que considera a estrutura de preferencias do decisor, transformando múltiplas funções objetivos em uma única função objetivo, considerando a estrutura axiomática de um método específico;

- Otimização multiobjectivo: identifica as soluções não dominadas, a fronteira de Pareto, sem considerar as preferencias do decisor.

Neste item, será feita a revisão de alguns métodos multicritérios que são usados no planejamento e priorização da manutenção para otimizar as estratégias de manutenção.

### 2.2.1 Métodos multicritério nas estratégias de manutenção

Neste item são apresentados alguns métodos multicritérios propostos para melhorar o estabelecimento das estratégias de manutenção nas organizações.

Com a finalidade de afrontar a incerteza nos julgamentos dos decisores ao estabelecer uma estratégia para aumentar a disponibilidade e confiabilidade das instalações de produção sem aumentar os custos, é aplicada uma modificação usando a logica *fuzzy* na metodologia AHP, usada para avaliar as diferentes estratégias de manutenção para diferentes equipamentos, onde as incertezas e imprecisões nos julgamentos são traduzidas em números *fuzzy*. O novo método de priorização usando a logica *fuzzy* proposto pode derivar em prioridades claras a partir de uma matriz de julgamentos *fuzzy* baseada na resolução de um problema de otimização com restrições não lineares. (WANG, CHU & WU, 2007).

Uma abordagem MCDM baseado no processo de hierarquia analítica integrada (AHP) é proposto para realizar uma comparação entre as políticas de manutenção onde estão envolvidos múltiplos critérios muitas vezes em conflito uns com outros. O método AHP é utilizado para determinar os pesos de importância dos critérios, posteriormente é usado a logica *fuzzy* para a classificação das políticas de manutenção e escolher as mais apropriadas. Além disso, a logica *fuzzy* para a priorização por similaridade à solução ideal é usada para a verificação da abordagem integrada proposta. (AZADEH & ZADEH, 2016)

O ELECTRE III, baseado na classificação de números *fuzzy*, é proposto para selecionar a estratégia de manutenção mais apropriada para uma máquina sob a condição de que algumas avaliações de cada estratégia de manutenção sejam determinísticas e outras sejam difusas. O índice de distância entre o ponto centroide de um número *fuzzy* e o ponto original é empregado para lidar com as avaliações difusas. Em seguida, eles são tratados como avaliações deterministas enquanto ELECTRE III é usado. O resultado da análise de caso mostra que o método proposto pode selecionar a estratégias de manutenção mais adequada para uma máquina quando se considera a avaliação difusa ou determinística em relação a cada critério de avaliação. (LI & XU, 2007)

As ações de manutenção são essenciais nos sistemas onde as falhas podem ser desastrosas. O Modelo PROMETHEE é utilizado para o estabelecimento das políticas e o planejamento da manutenção, analisando os critérios de confiabilidade e custo simultaneamente para tratar as periodicidades da substituição de um determinado item e na ausência de dados sobre falhas. O método fornece suporte adequado para o tomador de decisão, inserindo sua estrutura de preferências subjetivas no processo de escolha dos parâmetros que configuram uma política de manutenção e assim, determinar o momento oportuno para substituir um item. (CAVALCANTE, FERREIRA & DE ALMEIDA, 2008)

O método multicritério de classificação PROMSORT (PROMETHEE Sorting), baseado no método PROMETHEE que designa as alternativas a categorias ordenadas predefinidas, é proposto para a classificação dos modos de falha definidos a partir do MCC (Manutenção centrada em confiabilidade), o método é uma boa alternativa para apoiar a decisão dos gestores para a priorização de recursos destinados ao combate dos modos de falha considerados mais críticos para a organização. (CAVALCANTI, GARCEZ & DE ALMEIDA, 2011).

Cavalcante e de Almeida (2007), propõe um modelo multicritério para proporcionar ao decisor uma ferramenta quantitativa para apoiar a definição de uma política de inspeção da manutenção integrando suas preferências, avaliando os critérios de custo, *downtime* e os efeitos das falhas a través do método PROMETHEE III que proporciona um *ranking* de alternativas.

Dois modelos baseados nas metodologias PROMETHEE e F-PROMETHEE são propostos para a priorização dos modos de falha identificados através da aplicação da abordagem RCM. Além do emprego destas metodologias, uma inferência *fuzzy* foi desenvolvida para calcular a gravidade de cada modo de falha. Este procedimento possibilitou comparações e avaliações de sensibilidade entre os modelos propostos e algumas possíveis variantes deles. (MOREIRA, DUPONT & VELLASCO, 2009)

Com o propósito de ser mais eficiente na avaliação dos níveis de prioridade das diferentes alternativas de manutenção, é proposto uma abordagem integrada AHP e GP (*Goal Programing*) para a manutenção centrada em confiabilidade, na primeira fase fornece os níveis de prioridade para as diferentes políticas de manutenção considerando os critérios clássicos do FMECA; na segunda fase, é formulado o modelo *Goal Programing* através da identificação do melhor conjunto dos tipos de manutenção para os modos de falha considerados e finalmente são comparadas três alternativas de estratégias de manutenção (corretiva, preventiva e preditiva) com o método AHP, considerando os custos e as restrições de horas de trabalho. Esta integração dos métodos AHP e GP permite assignar recursos às diferentes estratégias de

manutenção, particularmente importante em situações onde o decisor pode escolher entre diferentes objetivos sujeitos a várias condições de restrição. (BERTOLINI & BEVILACQUA, 2006).

Sachdeva, Kumar e kumar (2009), propõem uma técnica baseado no FMEA em conjunto com o método TOPSIS para determinar o número de riscos e para superar as limitações do RPN convencional; esta técnica permite levar em consideração os diversos aspectos possíveis relativos aos problemas de seleção de manutenção. O método é baseado em uma técnica de ordem de preferências por semelhança com solução ideal (TOPSIS). TOPSIS é uma metodologia de tomada de decisão multicritério baseada na medição euclidiana de uma alternativa a partir de uma meta ideal.

Um novo método de tomada de decisão multicritério (MCDM) denominado FlowSort-GDSS é usado para classificar os modos de falha em classes de prioridade, envolvendo múltiplos decisores. A essência deste método reside na comparação par a par entre os modos de falha e os perfis de referência estabelecidos pelos tomadores de decisão sobre os fatores de risco. O FlowSort foi desenvolvido como uma adaptação do método de classificação PROMETHEE II. (LOLLI *et al* , 2105).

### 3 DESCRIÇÃO DO MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE PLANTAS INDUSTRIAIS USANDO RCM

Neste capítulo é apresentado o modelo de decisão multicritério baseado na abordagem RCM proposto por Alencar e de Almeida (2015) e o procedimento para sua aplicação na priorização de modos de falha em plantas industriais.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO

De acordo com Desphande e Modak (2002), o RCM, em sua forma clássica, inicia com uma revisão de cada equipamento no seu contexto operacional. O primeiro passo no processo RCM é definir as funções de cada ativo físico em um contexto operacional junto com os padrões de desempenho desejados (MOUBRAY, 1997).

Moubray (1997) estabelece cinco passos para a implementação do RCM:

- Definir as funções de cada ativo físico dentro do contexto operacional, de acordo com os padrões de desempenho desejado;

- Determinação das formas que o ativo físico pode falhar, para identificar as falhas que podem ocorrer. Para isso, o RCM usa dois níveis, o primeiro identifica que situações levariam a um estado de falha, depois se pergunta que eventos podem ocasionar falha ao ativo físico;

- Identificar os modos de falhas, são eventos que causam as falhas funcionais;

- Descrever os efeitos de falhas, o que ocorre quando a falha acontece;

- Avaliação das consequências das falhas: O que tem sido atingido pelas falhas.

Com a incorporação do modelo multicritério, é considerado dentro das avaliações das consequências dos modos de falha a existência de um decisor que pode influenciar as decisões em função de suas preferências.

Na aplicação do modelo clássico RCM, são identificadas as consequências dos modos de falha e estabelecidas as atividades de manutenção para cada um deles de acordo com a criticidade que representam para o sistema. Esta criticidade permite priorizar os modos de falha para o planejamento da manutenção e é feita através da avaliação FMEA (*Failure Mode Effects Analysis*).

FMEA é uma técnica que tem como objetivo é priorizar os modos de falha do produto ou sistema, a fim de atribuir os recursos limitados aos itens de risco mais graves. O análise de criticidade é realizado tendo em conta os fatores de risco: ocorrência (O), gravidade (S) e detecção (D). O objetivo do FMEA. Em geral, a priorização de modos de falha para ações

corretivas é determinada através do número de prioridade de risco (RPN), que é obtido por encontrar a multiplicação de O, S e D de uma falha. (LIU, LIU & LIU, 2013)

Na figura 3.1 é apresentado o procedimento para a aplicação do modelo RCM clássico.



*Figura 3.1 Procedimento RCM  
Fonte: Adaptado de Moubray (1997)*

A proposta de um modelo de decisão consiste na incorporação de um método multicritério dentro da abordagem RCM, com a finalidade de melhorar os resultados que podem ser obtidos através do RCM ao considerar dentro do modelo as preferências do decisor. Para este modelo foi escolhido o método multicritério MAUT que inclui dentro de sua modelagem a base probabilística necessária para o análise.

No modelo multicritério são considerados os valores das consequências para estabelecer as preferências do decisor. A função utilidade para os casos são considerados com independência preferencial, pois a alteração de um determinado atributo não interfere nas preferências do decisor.

Nas figura e 3.2 são apresentado o procedimento para a aplicação do modelo multicritério baseado na abordagem RCM respectivamente.

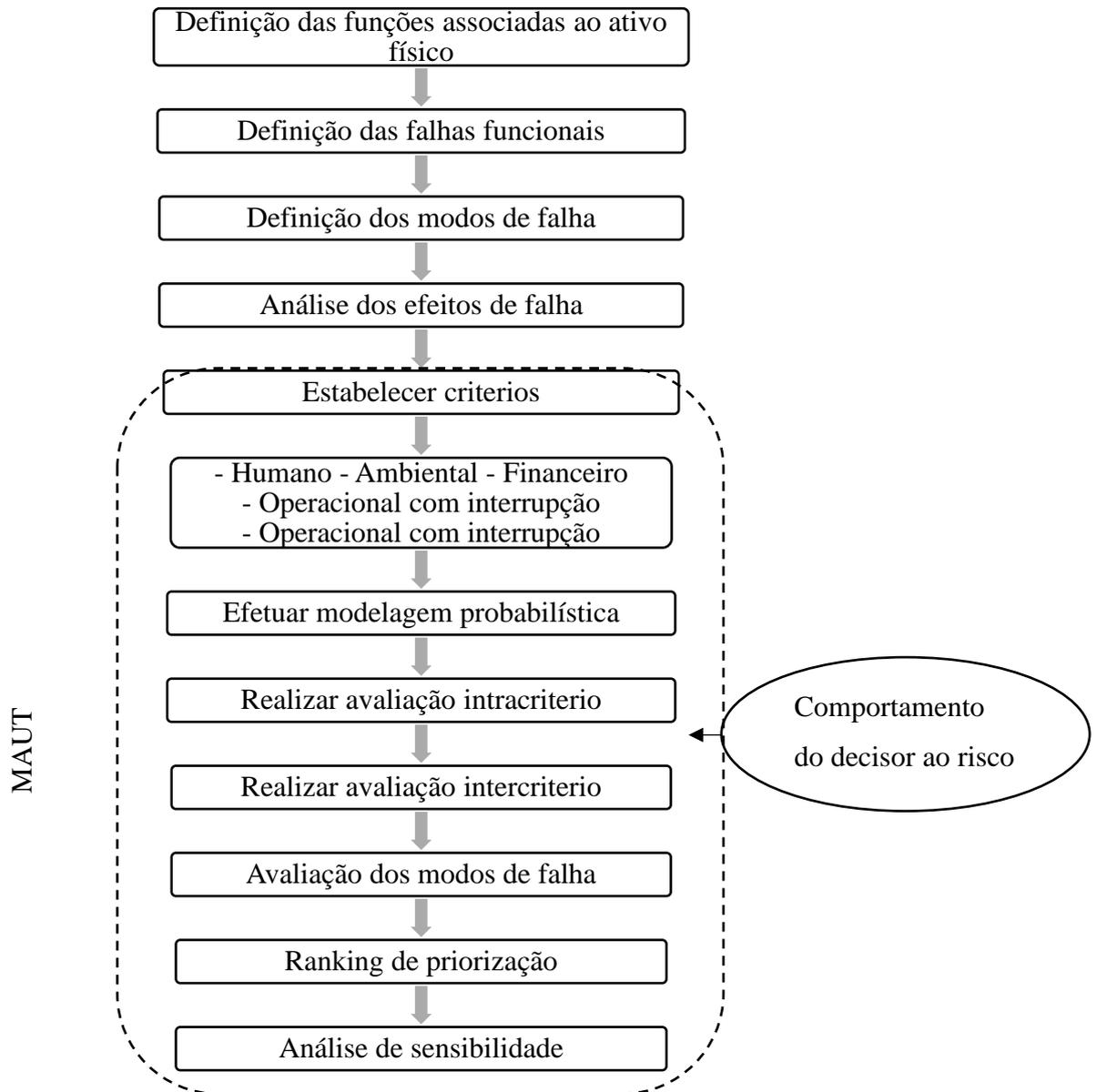


Figura 3.2 Procedimento RCM aplicando o modelo multicriterio proposto  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

O procedimento para a construção do modelo de decisão multicritério que será implementado, consiste em três fases principais que serão divididas cada uma em várias etapas como é mostrado na figura (DE ALMEIDA, 2013).

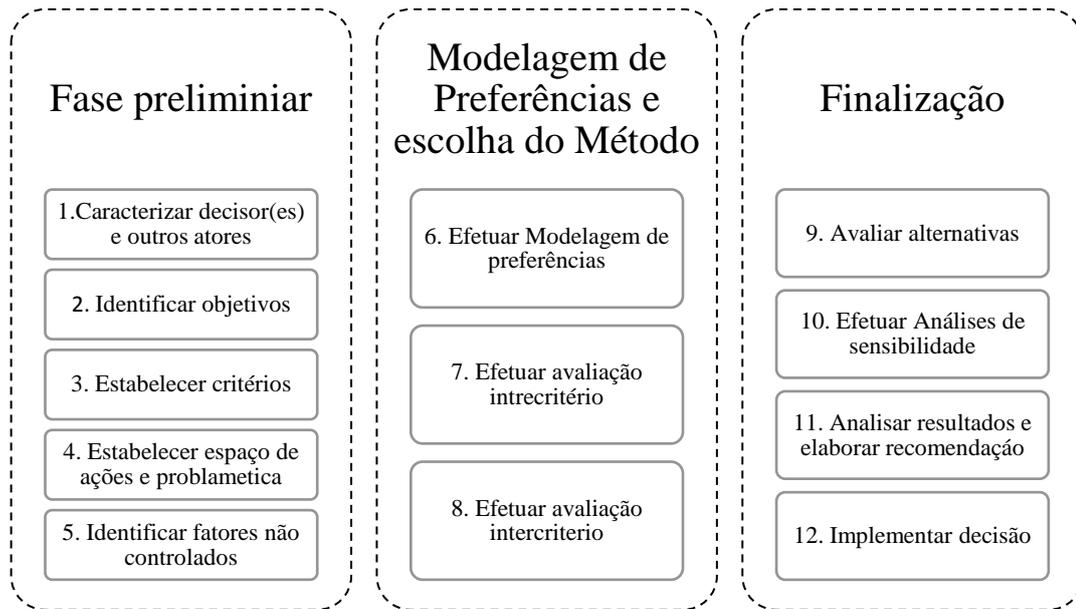


Figura 3.3 Procedimento para resolução de um problema de decisão  
 Fonte: Adaptado de De ALMEIDA (2013, p.165)

### 3.1.1 Caracterização dos decisores

Segundo de Almeida *et al* (2015), a construção de modelos e escolha de métodos estão associadas aos atores do processo, que pode ser só um decisor ou um grupo de decisores, que tem poder sobre a decisão e serão responsáveis pelas consequências da tomada de decisão em questão.

No contexto da tomada de decisão no planejamento da manutenção para o modelo considerado, o decisor é caracterizado por

- Ter múltiplas alternativas para escolher
- Ter uma estrutura de preferencias sobre as consequências das escolhas
- Ter um conhecimento sobre os dados de confiabilidade dos sistemas e seu comportamento com o ambiente

O decisor para a tomada de decisão na manutenção tem conhecimento dos equipamentos e das prioridades no estabelecimento dos planos de manutenção, pelo que estabeleceria suas preferências de acordo com as necessidades da organização

### 3.1.2 Identificação dos objetivos

Os objetivos numa situação de decisão devem vir das pessoas interessadas e com conhecimento da situação, estes objetivos podem representar grandes grupos com diversos

interesses, em outros casos podem representar um indivíduo que enfrenta seu próprio problema de decisão (KEENEY, 1996).

Na área de manutenção procura-se por estabelecer a estratégia que permita otimizar os processos de manutenção dos equipamentos, estas estratégias são definidas de acordo com as necessidades de cada indústria.

O objetivo no problema de decisão é obter a melhor priorização na manutenção em plantas industriais com base na probabilidade de falhas dos sistemas e nas consequências que podem trazer os modos de falhas para os processos se eles ocorrer.

Os valores dos decisores são explicitados nos objetivos, sendo eles a base de interesse em qualquer decisão. (DE ALMEIDA, 2013).

### 3.1.3 *Identificação das consequências*

Na tomada de decisão deve-se identificar e descrever os critérios que serão considerados para o processo decisório. É necessário avaliar o comportamento das consequências em relação à incerteza e o impacto das consequências sobre o objetivo que vai ser atingido. (DE ALMEIDA *et al*, 2015).

Conforme Roy (1996) uma família de critérios deve ser estabelecida, e para tal deve atender a três propriedades: não redundância, todos os critérios devem estar presentes representando todos os objetivos do problema e as preferências do decisor em relação a cada critério devem ser coerentes com a avaliação global.

Cada vez que uma falha ocorre a organização que usa o recurso é afetada de alguma forma. Algumas são falhas afetam a saída de produto final, outras ameaçam a segurança ou meio ambiente, alguns aumentam os custos operacionais e em outros casos a falha pode não ter nenhuma consequência mas podem expor a organização ao risco de falhas mais graves. (MOUBRAY, 1997).

Nesta etapa do processo, são identificados os critérios relevantes para o problema e o contexto analisado.

- Impacto na segurança do pessoal: Relacionado com o pessoal atingido pelas consequências das falhas. Para a estimativa das consequências é considerado o número de pessoas mortas e feridas como consequência das falhas,
- Impacto no meio ambiente: Leva se em conta os danos ocasionados no ambiente pela falha. Para a estimativa da consequência é considerado o impacto causado em uma área (m<sup>2</sup>) desde o ponto em que ocorre a falha,

- Impacto nos custos: Refere se aos prejuízos monetários ocasionados pelas falhas. Para a estimativas da consequência são considerados os custos em términos monetários, associados às paradas da operação e/ou às reparações além dos custos pelo não cumprimento de prazos de entregas,
- Impacto na operação: Refere se ao grau de afetação do processo por paradas no sistema. O *downtime* é utilizado para a estimativa das consequências,
- Sem Impacto na operação: Não existe interrupção de produção, mas a existência do modo de falha pode repercutir na operação de não ser reparada, podendo existir consequências graves no futuro. O *downtime* é utilizado para a estimativa das consequências.

### 3.1.3.1 Modelagem probabilística.

- Por exemplo, para o cálculo da utilidade para a dimensão humana identificada como  $u(h)$  são avaliadas as preferencias do decisor considerando uma loteria donde se tem 50% de probabilidade de obter o pior resultado da consequência representado como  $h_0$  (menor quantidade de pessoas afetadas),  $h_1$  (maior número de pessoas afetadas), o decisor deverá escolher se é preferível, indiferente ou menos preferível uma consequência certa  $h=(h_0+h_1)/2$ . Onde uma preferência pela consequência certa indica aversão ao risco. A mesma linha de raciocínio é empregada para as demais dimensões avaliadas.
- Nas dimensões operacionais com e sem afetação do processo por paradas é considerado o *downtime* que ocorre após falha é considerada uma função de densidade de probabilidade lognormal para o cálculo da função consequência. (ALENCAR & DE ALMEIDA, 2015)

$$g(t|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \text{ para } (t \geq 0) \text{ Equação 3.1}$$

### 3.1.4 Espaço de ações e problemática

A estrutura do espaço de ações vai estabelecer um marco importante para a escolha do método multicritério a ser utilizado (DE ALMEIDA, 2013).

A problemática deste trabalho está baseada na priorização dos modos de falha em plantas industriais como alternativas discretas, sendo considerado um problema de ordenação de alternativas para estabelecer as estratégias de manutenção.

Um modo de falha é a maneira pela qual uma falha se manifesta, e é definida como o não cumprimento de uma das funções (RAUSAND & OIEN, 1996). Moubray (1997) descreve os modos de falha como todos os eventos que causam uma falha funcional.

Modos de falha incluem aquelas que tenham ocorrido no mesmo ou similar equipamento operando no mesmo contexto, falhas que atualmente são prevenidas pelos regimes de manutenção existentes e falhas que ainda não ocorrem, mas são consideradas como possível de ocorrer.

### 3.1.5 *Análises das consequências*

Para a análise das consequências serão utilizados elementos da teoria da decisão. O estado da natureza é definido como “ $\theta$ ”, expressando a incerteza associada ao problema, “mf” representa o conjunto modos de falha considerados, sendo as consequências representadas por “c”. Através de uma distribuição de probabilidades sobre consequências determinísticas e a elicitación de funções utilidades para estas consequências, são tratadas as incertezas associadas em “mf”.

Os valores das funções utilidades são definidos em um intervalo entre (0,1), onde 0 é associado ao valor menos preferível e 1 ao valor mais preferível. As funções utilidades das consequências são dadas por

Função utilidade variáveis discretas

$$U(\theta, mf) = \sum c P(c|\theta; mf) U(c) \quad \text{Equação 3.2}$$

Função utilidade para variáveis contínuas

$$U(\theta, mf) = \int c P(c|\theta; mf) U(c) dc \quad \text{Equação 3.3}$$

A função consequência necessária para a avaliação intracritério para as dimensões humana, financeira, ambiental é dada pela função  $P(c|\theta, mf)=1$ , pois é considerada que o estado da natureza é verificado e que é certa a ocorrência das consequências

### 3.1.6 *Modelagem de preferências*

A estrutura de preferências neste passo deve ser avaliada com o decisor, avaliando algumas propriedades básicas da estrutura de preferências (P,I) como a transitividade e se o

decisor pode criar uma pre-ordem ou ordem no espaço de consequências (DE ALMEIDA *et al*, 2015)

Na estrutura de preferências do decisor para a problemática de priorização da manutenção em plantas industriais, é definida uma estrutura do tipo (P,I) pois o decisor expressa suas preferências sobre o conjunto de consequências do problema e não admite incomparabilidades, pelo qual um modelo tradicional pode ser usado, como o modelo de agregação aditiva.

Considerando a estrutura de preferências do decisor e estabelecendo tipo de racionalidade compensatório mais adequado para ele, é selecionado o método MAUT como modelo preliminar de avaliação.

De acordo com De ALMEIDA (2013), escolha de MAUT é apropriada para o caso em que um decisor que esteja em conformidade com a racionalidade proposta pela estrutura axiomática da teoria, que implica em uma lógica de compensação entre os critérios, de modo a ter uma única função que agregue todos os critérios numa função analítica.

### 3.1.7 Avaliação intracriterio

Nas etapas anteriores foi definido o método MAUT para a tomada de decisão, considerando as características probabilísticas do problema e a estrutura de preferências do decisor.

Para a avaliação intracriterio dentro do contexto da manutenção são considerados dos cenários, o primeiro consiste na ocorrência da falha para um componente, sendo representado por “ $\theta$ ” com probabilidade de ocorrência “ $\square(\theta)=\square$ ” e utilidade unidimensional “ $U(\theta,mf)=x$ ” com  $0 < x < 1$ ; o segundo cenário refere-se à não ocorrência da falha para um componente, representado por “ $\theta'$ ” com probabilidade de ocorrência de “ $1-\square$ ” e utilidade unidimensional “ $U(\theta',mf)=1$ ”. A soma das probabilidades deve ser igual a 1. Sendo a utilidade unidimensional obtida por

$$U = U(\theta,mf)\square(\theta) + U(\theta',mf)(1-\square(\theta)) \text{ Equação 3.4}$$

Para as utilidades unidimensionais é considerado o comportamento do decisor em relação ao risco, este comportamento está representado de acordo a três situações:

Comportamento de propensão ao risco

$$U(c) = e^{-bx} \text{ Equação 3.5}$$

Nesta função o valor de “ $x$ ” representa os valores das consequências numa dimensão para cada modo de falha, segundo de Almeida (2005) a função exponencial da equação 3.5, é usada

na prática, indicando que quando maior é o valor de “x” mais indesejável a situação  
Comportamento de neutralidade ante o risco

$$U(c) = a - bx \text{ Equação 3.6}$$

Onde a variável “x” representa os valores das consequências numa determinada dimensão e para cada modo de falha, os valores de “a” e “b” são constantes que asseguram que o valor da “U(c)” está dentro de intervalo [0,1]

Comportamento de aversão ao risco

$$U(c) = 1 - \left[ \frac{x}{\max(x)} \right]^N \text{ Equação 3.7}$$

Os valores da consequência para uma dimensão são representados pela variável “x”, o valor de “N” representa o fator de ajuste da curva

### 3.1.8 Avaliação intercriterio

Para a avaliação intercriterio são unidas as avaliações das utilidades unidimensionais a função utilidade multiatributo poder tomar a forma aditiva quando não existe dependência entre os atributos. A função utilidade é representada por

$$U(h,e,f,o,o') = k_1U(h)+k_2U(f)+k_3U(e)+k_4U(o)+k_5U(o') \text{ Ecuación 3.1}$$

- Onde k representa as constantes de escala e U as utilidades para cada critério:
- U(h): Função utilidade para a dimensão humana
- U(e): Função utilidade para a dimensão ambiental
- U(f): Função utilidade para a dimensão financeira
- U(o): Função utilidade para a dimensão operacional com parada na operação
- U(o'): Função utilidade para a dimensão operacional sem parada na operação
- K1: Constante de escala para a dimensão humana
- K2: Constante de escala para a dimensão ambiental
- K3: Constante de escala para a dimensão financeira
- K4: Constante de escala para a dimensão operacional com parada na operação
- K5: Constante de escala para a dimensão operacional sem parada na operação

Em relação ao modelo aditivo, o significado dos pesos, normalmente chamados de constantes de escala  $k_j$ , não envolve apenas a importância dos critérios e a sua elicitação está

relacionada com as escalas da função de valor  $v_j(x)$  em cada critério. Para o modelo aditivo existem procedimentos indiretos, nos quais uma inferência é feita, com base na avaliação global do decisor de algumas alternativas (DE ALMEIDA, 2013).

### 3.1.9 Avaliação de alternativas

Nesta etapa é efetuada a avaliação das alternativas considerando o método multicritério definido nas etapas anteriores, sendo MAUT o método usado.

Considerando as preferências do decisor em relação às consequências derivadas dos modos de falha e as probabilidades de ocorrência de cada um deles, é estabelecido um *ranking* para a priorização dos modos de falha nas estratégias de manutenção calculando as funções utilidades multi-atributos para cada modo de falha.

### 3.1.10 Análises de sensibilidade

Do resultado da etapa anterior obtém-se uma recomendação inicial que deverá ser analisada para confrontar sua robustez, esta análise é feita através da variação dos valores dos parâmetros do problema e como esta variação pode modificar a ordem de priorização dos modos de falha.

Um dos principais objetivos do análise de sensibilidade é identificar os parâmetros que são mais sensíveis, ou seja, aqueles que não podem ser alterados sem alterar a solução ótima do problema. (HILLIER & LIBERMAN, 2006).

Um das formas de realizar o análise de sensibilidade é através de um análise global, que segundo Sudred (2008), tenta quantificar a incerteza dos parâmetros de saída causados pelos parâmetros de entrada, que são avaliados isoladamente com outros.

Uma abordagem para esta forma de análise é por meio do uso do método Monte Carlo, onde é utilizado a geração de números aleatório para cada uma das entradas do modelo, aplica-se esse conjunto de dados gerados ao modelo e registra-se o resultado de saída. (DE ALMEIDA, 2013)

### 3.1.11 Analisar resultado e elaborar recomendação

Tem-se o análise final dos resultados que estabelece um *ranking* dos modos de falha que devem ser priorizados dentro do planejamento da manutenção, de acordo com as avaliações das consequências que foi feita pelo decisor.

Para a realização das recomendações, devem ser considerados os resultados obtidos na etapa de avaliação das alternativas e as observações necessárias relacionadas com os resultados do análise de sensibilidade.

### 3.1.12 *Implementar decisão*

Nesta etapa é executada a decisão final, estabelecendo a ordem de prioridade dos modos de falha obtidos através do método de tomada de decisão multicritério, para o planejamento da manutenção nas plantas industriais.

## 3.2 APLICAÇÃO DO MODELO

Neste item são apresentadas as aplicações numéricas utilizando o modelo de decisão multicritério proposto para a avaliação das consequências dos modos de falha obtidos através da abordagem RCM, além disso, são apresentados os resultados da aplicação do RCM clássico para ser analisados e comparados.

Na aplicação do modelo RCM, foram consideradas as etapas iniciais até a avaliação da criticidade dos modos de falha através do FMEA para sua priorização.

Para a aplicação do modelo foram considerados estudos de caso contidos em quatro artigos publicados em periódicos onde são aplicados métodos/modelos que consideram a criticidade dos modos de falha na gestão de ativos. Quando da ausência de dados, foram considerados dados realísticos baseados em outras fontes especificadas neste trabalho caso a caso.

### 3.2.1 *Aplicação numérica 1*

Para esta aplicação são considerados “i” componentes relevantes para o processo e “n” modos de falhas ( $MF_{ni}$ ) para cada componente com suas probabilidades de ocorrência “ $\square(\theta)_{MF}$ ”, um usuário e 5 dimensões para a estimação das consequências.

A análise de criticidade é baseado no estudo realizado por Sachdeva, Kumar e Kumar (2009) onde é apresentado uma abordagem de decisão com múltiplos fatores para priorizar causas de falhas para o digestor do sistema de polpação de uma fábrica de papel como alternativa à abordagem tradicional do FMEA. A abordagem proposta em Sachdeva, Kumar e Kumar (2009) na técnica TOPSIS onde é formulado um *ranking* de prioridades. A análise da priorização de causas de falha fornece uma estrutura para decidir sobre o tipo de estratégias de manutenção para diferentes modos de falha.

Para a priorização utilizando a abordagem clássica do RCM, na etapa de análise dos efeitos de falha foi considerada a ferramenta FME para avaliar a ocorrência, detectabilidade e severidade dos modos de falha (OxDxS), para estabelecer a criticidade de cada um deles.

As escalas para a avaliação da ocorrência, detectabilidade e severidade foram estabelecidas de acordo com a avaliação apresentada para o estudo de caso feito por Sachdeva, Kumar e Kumar (2009) e são apresentadas nas tabelas 3.1, 3.21 e 3.3.

**Ocorrência:** Trata-se da frequência com que ocorre um modo de falha; Maior valor indica maior criticidade do item. A probabilidade de ocorrência de falha foi avaliada em função do tempo médio entre falhas.

**Detectabilidade:** A possibilidade de detectar uma falha depende de vários fatores, tais como a capacidade do operador ou pessoal de manutenção para detectar falhas por inspeção periódica ou com a ajuda de auxiliares de diagnóstico de máquina tais como controles automáticos, alarmes e sensores.

**Severidade:** Pontuação para este fator são atribuídos de acordo com o julgamento qualitativo do pessoal de manutenção. Os vários aspectos considerados para a obtenção de uma tabela de pontuação baseada na avaliação linguística são perda de produção, custos de peças sobressalentes e mão-de-obra de manutenção, etc.

*Tabela 3.1- Escala para avaliação de ocorrência*

Ocorrência	Descrição	Score
Pouco menos	>3 anos	1
Raro	2-3 anos	2
Muito pouco	1-2 anos	3
Pouco	3/4 - 1 anos	4
Médio	6 - 9 meses	5
Moderadamente alto	4 - 6 meses	6
Alto	2 - 4 meses	7
Muito alto	1 - 2 meses	8
Extremadamente alto	< 30 dias	9

*Fonte: Adaptado de Sachdeva, Kumar e Kumar (2009)*

*Tabela 3.2- Escala para avaliação de detectabilidade*

Detectabilidade	Descrição (Probabilidade de não detecção %)	Score
Pouco menos	<10	1
Raro	10-20	2

Muito pouco	21-20	3
Pouco	31-40	4
Médio	41-50	5
Moderadamente alto	51-60	6
Alto	61-70	7
Muito alto	71-80	8
Extremadamente alto	>80	9

Fonte: Adaptado de Sachdeva, Kumar e Kumar (2009)

Tabela 3.3- Escala para avaliação de severidade

Severidade	Score
Extremamente baixo	1
Muito baixo	2
Baixo	3
Razoável	4
Médio	5
Moderadamente alto	6
Alto	7
Muito alto	8
Extremadamente alto	9

Fonte: Adaptado de Sachdeva, Kumar e Kumar (2009)

Aplicando o método RCM clássico para a avaliação das criticidades dos modos de falha, de acordo com as avaliações realizadas por Sachdeva, Kumar e Kumar (2009) para os critérios de ocorrência, detectabilidade e severidade, são obtidos os resultados que são apresentados na tabela 3.13, onde os modos de falha são priorizados de acordo com a criticidade que representam para a normalidade da operação.

Tabela 3.4- Ranking da criticidade dos modos de falha avaliados com o RCM

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Ocorrência	Severidade	Detetabilidade	Criticidade	Posição no Ranking
Mau funcionamento do motor da válvula (MF <sub>11</sub> )	6	4	7	168	4

Ruptura interna (MF <sub>21</sub> )	4	5	4	80	6
Mau Funcionamento do operador de válvula (MF <sub>32</sub> )	6	3	5	90	5
Ligação mecânica (MF <sub>43</sub> )	3	4	5	60	8
Ruptura interna (MF <sub>24</sub> )	4	7	9	252	2
Falha no operador de válvula(MF <sub>54</sub> )	6	6	7	252	1
Mau funcionamento do operador de válvula (MF <sub>35</sub> )	6	6	5	180	3
Obstrução (MF <sub>66</sub> )	4	4	4	64	7
Ligação mecânica (MF <sub>46</sub> )	3	3	6	54	9

Fonte: Adaptado de Sachdeva, Kumar e Kumar (2009)

Para a aplicação do modelo multicritério foram consideradas as probabilidades  $\square(\theta)$  de acordo com os intervalos da escala de ocorrência para o estudo de caso do artigo base, que são apresentados na tabela 3.1 e as avaliações dos modos de falha neste critério.

Tabela 3.5- Componentes, modos de falha e probabilidades de ocorrência

Componente “i”	Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	“ $\square(\theta)_{MF}$ ”
Válvula de alimentação de cavacos (1)	Mau funcionamento do motor da válvula (MF <sub>11</sub> )	0,008333
	Ruptura interna (MF <sub>21</sub> )	0,0037037
Operador de válvula remota (2)	Mau Funcionamento do operador de válvula (MF <sub>32</sub> )	0,008333
Válvula de controle de temperatura (3)	Ligação mecânica (MF <sub>43</sub> )	0,002777
Controlador do ciclo de tempo de pressão (4)	Ruptura interna (MF <sub>24</sub> )	0,0037037
	Falha no operador de válvula(MF <sub>54</sub> )	0,008333
Fluxo de vapor e válvula de controle (5)	Mau funcionamento do operador de válvula (MF <sub>35</sub> )	0,008333
Válvula de linha de sopros(6)	Obstrução (MF <sub>66</sub> )	0,0037037
	Ligação mecânica (MF <sub>46</sub> )	0,002777

Fonte: Adaptado de Sachdeva, Kumar e Kumar (2009)

Para cada dimensão considerada são calculadas as utilidades unidimensionais e o conjunto de consequências.

Os valores das consequências para a dimensão humana e ambiental baseado na funcionalidade das partes (associado com o modo de falha) e no conhecimento de especialista. Uma vez as peças móveis são mais propensas a acidentes. (Sachdeva, Kumar & Kumar, 2009).

Os valores para as consequências financeiras foram estimados com base na informação registrada no *report* do grupo *Leadership* para a indústria de papel do ano 2014 para os custos de não operatividade do sistema por manutenção.

- Calculo dimensão humana: O valor da  $U_h(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\square(\theta')$ " =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_h(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(h)$  é definida pelo comportamento de aversão ao risco do decisor.

$$U(h) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^3 \text{ Equação 3.8}$$

Tabela 3.6- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	No. de pessoas atingidas	U(h)	U <sub>h</sub> (θ', MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	2	0,997629	0,99998
MF <sub>21</sub>	3	0,992	0,99997
MF <sub>32</sub>	2	0,997629	0,99998
MF <sub>43</sub>	4	0,981037	0,99995
MF <sub>24</sub>	10	0,703704	0,99890
MF <sub>54</sub>	12	0,488	0,99573
MF <sub>35</sub>	15	0	0,99166
MF <sub>66</sub>	4	0,98104	0,99993
MF <sub>46</sub>	6	0,936	0,99982

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Calculo dimensão ambiental: O valor da  $U_a(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\square(\theta')$ " =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_a(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(a)$  é definida pelo comportamento neutro ao risco do decisor.

$$U(e) = -0,015x + 1 \text{ Equação 3.9}$$

Tabela 3.7- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Área atingida (m <sup>2</sup> )	U(e)	U <sub>e</sub> (θ', MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	15	0,775	0,99813
MF <sub>21</sub>	25	0,625	0,99861

MF <sub>32</sub>	30	0,55	0,99625
MF <sub>43</sub>	20	0,7	0,99917
MF <sub>24</sub>	35	0,475	0,99806
MF <sub>54</sub>	60	0,1	0,99250
MF <sub>35</sub>	65	0,025	0,99188
MF <sub>66</sub>	15	0,775	0,99917
MF <sub>46</sub>	40	0,4	0,99833

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- **Calculo dimensão financeira:** Para as consequências financeiras as considerados os custos de manutenção e custos por operação interrompida. O valor da  $U_f(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\square(\theta')$ " =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_f(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(f)$  é definida pelo comportamento de propensão ao risco do decisor.

$$U(f) = e^{-0,01x} \text{ Equação 3.10}$$

Tabela 3.8- Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Prejuízos financeiros (\$R)	U(f)	$U_f(\theta', MF_{ni})$
MF <sub>11</sub>	1157,020	0,99661	0,99997
MF <sub>21</sub>	1599,41	0,99531	0,99998
MF <sub>32</sub>	952,84	0,99720	0,999976
MF <sub>43</sub>	1088,96	0,99681	0,999991
MF <sub>24</sub>	2348,07	0,99312	0,999975
MF <sub>54</sub>	1973,74	0,99422	0,999952
MF <sub>35</sub>	1769,56	0,99481	0,999957
MF <sub>66</sub>	1157,02	0,99661	0,999987
MF <sub>46</sub>	952,84	0,99720	0,999992

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- **Calculo dimensão operacional (O):** Esta dimensão considera os efeitos da falha para o normal funcionamento da operação, considerando que se existe a falha a operação deve parar durante o tempo de reparo, a medida deste tempo está dada pelo *downtime*.

O valor da  $U_o(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\square(\theta)$ " =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(o)$  é definida pelo comportamento propenso ao risco do decisor.

$$U(o) = e^{-0,25x} \text{ Equação 3.11}$$

Tabela 3.9- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Downtime (horas)	U(o)	U <sub>o</sub> (θ', MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	4,32	0,03781	0,99198
MF <sub>21</sub>	6	0,00142	0,99630
MF <sub>32</sub>	-	1	1
MF <sub>43</sub>	4,4	0,00077	0,99723
MF <sub>24</sub>	-	1	1
MF <sub>54</sub>	-	1	1
MF <sub>35</sub>	6,4	0,00009	0,99167
MF <sub>66</sub>	5,76	0,00011	0,99630
MF <sub>46</sub>	-	1	1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Cálculo dimensão operacional sem interrupções: Nesta dimensão é avaliado o *downtime* do modo de falha, sabendo que a ocorrência da falha não tem repercussões na continuidade da operação, mas pode implicar complicações graves no futuro de não ter feito a manutenção.

O valor da  $U_o'(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\square(\theta)$ " =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o'(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(o')$  é definida pelo comportamento do decisor.

$$U(o') = e^{-0,25x} \text{ Equação 3.12}$$

Tabela 3.10- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas na operação

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Downtime (horas)	U(o')	U <sub>o</sub> '(θ', MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	-	1	1
MF <sub>21</sub>	-	1	1
MF <sub>32</sub>	4,8	0,03201	0,99193

MF <sub>43</sub>	-	1	1
MF <sub>24</sub>	4,56	0,01758	0,99636
MF <sub>54</sub>	6,16	0,00121	0,99168
MF <sub>35</sub>	-	1	1
MF <sub>66</sub>	-	1	1
MF <sub>46</sub>	4,72	0,00277	0,99723

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O seguinte passo do processo de tomada de decisão que após dos cálculos das utilidades, consiste em calcular a função multiatributo. Nesta etapa é considerada a escolha de consequências feita pelo decisor dada a ocorrência de falhas utilizando loterias 50-50 entre o melhor e pior caso para cada caso. As constantes de escala são estabelecidas com base nos procedimentos de elicitación baseado na comparação de loterias (KEENEY & RAIFFA, 1976).

Os valores obtidos foram: K1= 0,35, K2= 0,2, K3= 0,3, K4=0,08, K5= 0,07.

Após de definir as constantes de escalas, são calculadas as utilidades mutiatributo para cada modo de falha de acordo com a equação 3.4. Os Valores obtidos são descritos na tabela 3.11 Para facilitar a interpretação, é feita uma conversão de escala para as utilidades.

Tabela 3.11- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	U(h,e,f,o,o')	Conversão de escala
MF <sub>11</sub>	0,99897	0,87070
MF <sub>21</sub>	0,99941	0,96269
MF <sub>32</sub>	0,99867	0,80903
MF <sub>43</sub>	0,99959	1,00000
MF <sub>24</sub>	0,99896	0,86997
MF <sub>54</sub>	0,99641	0,33894
MF <sub>35</sub>	0,99478	0,00000
MF <sub>66</sub>	0,99951	0,98304
MF <sub>46</sub>	0,99941	0,96219

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Com a conversão de escala para as utilidades multiatributo de cada modo de falha pode ser estabelecido um *ranking* dos modos de falha para ser priorizados no planejamento da manutenção.

Na tabela 3.12 verifica-se a ordem dos modos de falha coincidindo a conversão de escala dentro de um intervalo entre  $[0,1]$  para as utilidades, onde “0” representa o valor menos preferível e “1” o valor mais preferível. Neste contexto é evidenciado que o modo de falha MF35 é o mais crítico para ser priorizado, com uma utilidade de “0” na conversão de escala, pelo que deve ser o primeiro em ser considerado para os planos de manutenção pois representa as consequências mais críticas para o decisor.

Tabela 3.12- Ranking dos valores da função utilidades multiatributo para cada modo de falha

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	U(h,e,f,o,o’)	Conversão de escala
MF35	0,9947789	0
MF54	0,9964097	0,3389406
M32	0,9986715	0,8090316
MF24	0,9989647	0,8699703
MF11	0,9989682	0,8706979
MF46	0,9994084	0,9621884
MF21	0,9994108	0,9626855
MF66	0,9995087	0,9830436
MF43	0,9995903	1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Uma comparação dos incrementos dos valores das utilidades dos modos de falha é possível através dos valores do *ranking* da função utilidade multiatributo. Os resultados desta comparação são apresentados na tabela 3.13, onde RI significa razão de incremento.

Os resultados tabela evidenciam das diferenças dos modos de falha, pode-se ver que as maiores diferenças se encontram entre o modo de falha MF11 e MF46 com uma diferença de “0,0914905” e entre os modos de falha MF32 e MF24 com uma diferença de “0,0609387”, isto quer dizer que existe um incremento “184,0484812” vezes do MF11 para o MF46 e um incremento de “83,75302” vezes do M32 para o MF24. Também evidencia-se que existe um incremento significativo de “7,71141619” vezes do modo de falha MF54 para o modo de falha MF32, ou seja, entre eles existe uma diferença de “0,470091” entre os valores das utilidades.

Tabela 3.13- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha

		U(MF <sub>ni</sub> )		

Posição no ranking "r <sub>i</sub> "	Modo de Falha" MF <sub>ni</sub> "		$U(MF_{ni})_{r_i} - U(MF_{ni})_{r_{i+1}}$	$RI = (U(MF_{ni})_{r_i} - U(MF_{ni})_{r_{i+1}}) / (U(MF_{ni+1}) - U(MF_{ni})_{i+2})$
1	MF35	0	0,3389406	0,721010613
2	MF54	0,3389406	0,470091	7,714161937
3	M32	0,8090316	0,0609387	83,75302364
4	MF24	0,8699703	0,0007276	0,007952738
5	MF11	0,8706979	0,0914905	184,0484812
6	MF46	0,9621884	0,0004971	0,024417799
7	MF21	0,9626855	0,0203581	1,200614517
8	MF66	0,9830436	0,0169564	-
9	MF43	1	-	-

Fonte: Esta pesquisa (2017)

### 3.2.1.1 Análise de sensibilidade

Para verificar a robustez do modelo aplicado é realizado um análises de sensibilidade baseado nos parâmetros considerados apresentando dois cenários.

- Para o primeiro cenário de análise foram realizados variações nas constantes de escala, considerando elas iguais para todas as dimensões, encontra-se que ordem dos modos de falha não apresenta variações.
- No segundo cenário se realizou uma variação de 10% de aumento nos custos dos modos de falha (consequências da dimensão financeira), neste cenário são evidenciadas variações, entre uma e duas posições, na ordem de priorização dos modos de falha MF11, MF24, MF21, MF55 e MF43, como se mostra na figura 3.4.

Os resultados evidenciam que o procedimentos pode garantir os resultados obtidos da aplicação do modelo ao decisor.

## Variacão análise de sensibilidade

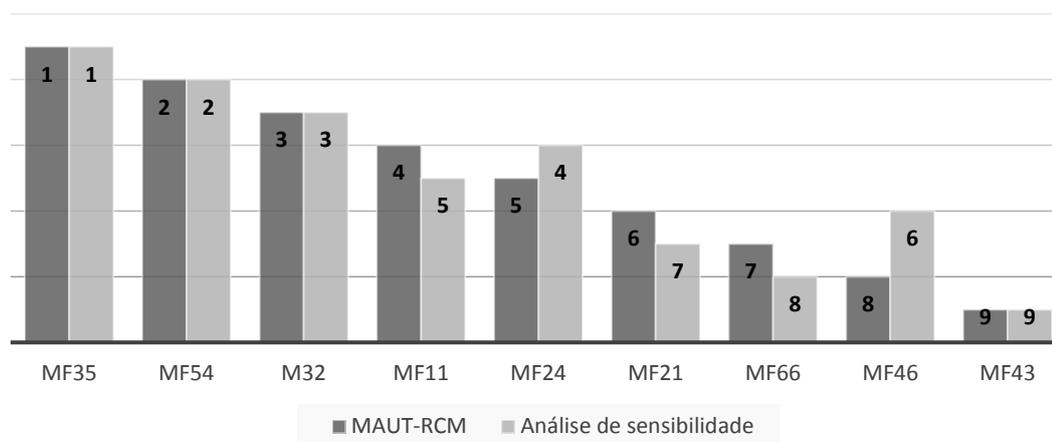


Figura 3.4 Variacão análise de sensibilidade  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

### 3.2.2 Aplicao numérica 2

Para esta aplicao são considerados “i” componentes relevantes para o processo e “n” modos de falhas ( $MF_{ni}$ ) para cada componente com suas probabilidades de ocorrência “ $\square(\theta)_{MF}$ ”, um único usuário e 5 dimensões para a estimacão das consequências (humana, ambiental, financeira, operacional com e sem interrupo da operao).

As dimensões são consideradas com independência preferencial, pois mudanças em uma delas não altera as preferências do decisor, neste sentido,  considerada uma funo utilidade aditiva de acordo com Keeney e Raiffa (1976).

Esta aplicao está baseado no estudo de caso feito para a otimizao da manuteno em sistemas de distribuo de energia proposto por Yssaad e Abene (2015).

Para a priorizao utilizando a abordagem clássico do RCM, foi considerado para a etapa de análises dos efeitos de falha a ferramenta FMEA, onde foram avaliados a ocorrência, detectabilidade e severidade dos modos de falha (OxDxS), para estabelecer a criticidade de cada um deles.

As escalas para a avaliao da ocorrência, detectabilidade e severidade foram estabelecidas de acordo com a avaliao apresentada para o estudo de caso feito por Yssaad e Abene (2015) e são apresentadas nas tabelas 3.14, 3.15 e 3.16.

Ocorrência: Representa a probabilidade ou a frequência de ocorrência do modo considerado de falha. A escala de classificao varia entre 0,1 e 0,5.

Tabela 3.14- Escala para avaliação de ocorrência

Ocorrência	Descrição	Score
Muito raro	Falha em 10 anos	0,1
Raro	Falha em 5 anos	0,2
Possível	Falha em 3 anos	0,3
Frequente	Falha em cada ano	0,4
Muito comum	Falha em 4-6 meses	0,5

Fonte: Adaptado de Yssaad e Abene (2015)

Detectabilidade: Representa a probabilidade de o modo de falha não ser detectado e acontecer o efeito mais grave. A escala de classificação varia de 1 a 5.

Tabela 3.15- Escala para avaliação de detectabilidade

Detectabilidade	Descrição	Score
Detecção óbvia	Tempo necessário para detectar a falha	0,1
Possível detecção	Falha detectável precoce	0,2
Detecção pouco provável	Falha difícil de detectar	0,3
Detecção improvável	Falha muito difícil de detectar	0,4
Não detectável	Falha indetectável	0,5

Fonte: Adaptado de Yssaad e Abene (2015)

Severidade: Representa a gravidade. A escala de classificação varia entre 0,1 e 0,5 com base na falha causada pelos efeitos em termos de: tempo de resposta, fonte de alimentação de qualidade, segurança de pessoas e bens.

Tabela 3.16- Escala para avaliação de Severidade

Severidade	Descrição	Score
Menor	Interrupção de energia < 5min	1
Significantes	Interrupção de energia < 20min	2
Médio	45 min<Interrupção de energia<30 min	3
Maior	1 h<Interrupção de energia<2h	4
Catastrófico	5h<Interrupção de energia<1 dia	5

Fonte: Adaptado de Yssaad e Abene (2015)

Aplicando o método RCM clássico para a avaliação das criticidades dos modos de falha e considerando as avaliações feitas no estudo de caso feito por Yssaaf e Abene (2015) para os critérios de ocorrência, detectabilidade e severidade, são obtidos os resultados que são apresentados na tabela 3.17, onde os modos de falha são priorizados de acordo com a criticidade que representam para a normalidade da operação.

Tabela 3.17- Ranking da criticidade dos modos de falha utilizando o método RCM

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Ocorrência	Severidade	Detectabilidade	Criticidade e	Ranking
Contato de dois linhas (MF11)	0,5	5	0,4	1	1
Envelhecimento (MF22)	0,5	5	0,4	1	6
Escorvamento (MF32)	0,5	4	0,4	0,8	7
Curto-circuito (MF43)	0,5	4	0,3	0,6	8
Poluições sonora (MF54)	0,5	5	0,4	1	3
Baixa resistência de isolamento (MF64)	0,5	5	0,4	1	4
Disparo do transformador para a alimentação (MF74)	0,5	5	0,4	1	2
O relâmpago (MF85)	0,2	1	0,2	0,04	13
Falhas internas(MF96)	0,5	5	0,4	1	5
Rede de alimentação(MF107)	0,5	3	0,4	0,6	11
Reset (MF118)	0,4	4	0,3	0,48	12
Falhas internas (MF98)	0,5	4	0,3	0,6	10
Fontes de permutações (MF128)	0,5	4	0,3	0,6	9

Fonte: Adaptado de Yssaaf e Abene (2015)

Os valores das consequências estão baseados no estudo de caso feito por em Yssaaf e Abene, 2015 e o conhecimento do especialista. Para as probabilidades  $\square(\theta)$ , foram considerados

os intervalos de ocorrência para o estudo de caso do artigo base, que são apresentados na tabela 3.18 e as avaliações dos modos de falha neste critério.

Tabela 3.18- Componentes, modos de falha e probabilidades de ocorrência

Componente “i”	Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	“ $\square(\theta)_{MF}$ ”
Linha Elétrica (1)	Contato de dois linhas (MF11)	0,25
Isolador de vidro ou cerâmica (2)	Envelhecimento (MF22)	0,2
	Escorvamento (MF32)	0,2
Barramentos (3)	Curto-circuito (MF43)	0,16
Transformador (4)	Poluições sonora (MF54)	0,21
	Baixa resistência de isolamento (MF64)	0,23
	Disparo do transformador para a alimentação (MF74)	0,2
Para-raios de Distribuição (5)	O relâmpago (MF85)	0,016
Disjuntor (6)	Falhas internas(MF96)	0,25
Fusíveis (7)	Rede de alimentação(MF107)	0,26
Seccionadores (8)	Reset (MF118)	0,16
	Falhas internas (MF98)	0,18
	Fontes de permutações (MF128)	0,15

Fonte: Adaptado de Yssaad e Abene (2015)

Para cada dimensão considerada são calculadas as utilidades unidimensionais e o conjunto de consequências.

- Calculo dimensão humana: O valor da  $U_h(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\square(\theta')$ ”=  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_h(\theta', MF_{ni})=1$ .

A função utilidade  $U(h)$  é definida pelo comportamento de aversão ao risco do decisor.

$$U(h) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^{3,5} \text{ Equação 3.13}$$

As utilidades dos modos de falha para a dimensão ambiental são apresentados na tabela 3.19.

Tabela 3.19- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	No. De pessoas atingidas	U(h)	Uh(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	20	0,54205	0,88551
MF <sub>22</sub>	24	0,13314	0,82663
MF <sub>32</sub>	23	0,25311	0,85062
MF <sub>43</sub>	21	0,45678	0,91308
MF <sub>54</sub>	16	0,79028	0,95596
MF <sub>64</sub>	15	0,83269	0,96152
MF <sub>74</sub>	15	0,83269	0,96654
MF <sub>85</sub>	0	1	1
MF <sub>96</sub>	25	0	0,75
MF <sub>107</sub>	22	0,36072	0,83379
MF <sub>118</sub>	10	0,95952	0,99352
MF <sub>98</sub>	18	0,68329	0,94299
MF <sub>128</sub>	17	0,74071	0,96111

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Cálculo dimensão ambiental: O valor da  $U_a(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\square(\theta')$ ” =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_a(\theta', MF_{ni}) = 1$ .

A função utilidade  $U(a)$  é definida pelo comportamento neutral ao risco do decisor.

$$U(e) = -0,01x + 1 \text{ Equação 3.14}$$

As utilidades dos modos de falha para a dimensão ambiental são apresentados na tabela 3.20.

Tabela 3.20- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Área atingida (m <sup>2</sup> )	U(e)	Ue(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	55	0,45	0,8625
MF <sub>22</sub>	50	0,5	0,9
MF <sub>32</sub>	56	0,44	0,888
MF <sub>43</sub>	15	0,85	0,976
MF <sub>54</sub>	60	0,4	0,874
MF <sub>64</sub>	57	0,43	0,8689
MF <sub>74</sub>	50	0,5	0,9
MF <sub>85</sub>	58	0,42	0,99072
MF <sub>96</sub>	20	0,8	0,95
MF <sub>107</sub>	5	0,95	0,987
MF <sub>118</sub>	15	0,85	0,976
MF <sub>98</sub>	16	0,84	0,9712
MF <sub>128</sub>	18	0,82	0,973

Fonte: Adaptado de Yssaad e Abene (2015)

- Cálculo dimensão financeira: O valor da  $U_f(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\square(\theta')$ ” =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_f(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(f)$  é definida pelo comportamento de aversão ao risco do decisor.

$$U(f) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^{2,5} \quad \text{Equação 3.15}$$

As utilidades dos modos de falha para a dimensão financeira são apresentados na tabela 3.21

Tabela 3.21- Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Prejuízos financeiros (\$R)	U(f)	Uf(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	345000	0	0,75
MF <sub>22</sub>	135000	0,904217	0,98084
MF <sub>32</sub>	135000	0,904217	0,98084
MF <sub>43</sub>	210000	0,71093	0,95375

MF <sub>54</sub>	240000	0,596373	0,91524
MF <sub>64</sub>	235000	0,617068	0,91193
MF <sub>74</sub>	230000	0,637113	0,92742
MF <sub>85</sub>	165000	0,8418162	0,99747
MF <sub>96</sub>	75000	0,977965	0,99449
MF <sub>107</sub>	75000	0,977965	0,99427
MF <sub>118</sub>	30000	0,997770	0,99964
MF <sub>98</sub>	25000	0,998586	0,99975
MF <sub>128</sub>	30000	0,997770	0,99967

Fonte: Esta pesquisa

- **Calculo dimensão operacional (O):** Esta dimensão considera os efeitos da falha para o normal funcionamento da operação, considerando que se existe a falha a operação deve parar durante o tempo de reparo, a medida deste tempo está dada pelo *downtime*.

O valor da  $U_o(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\square(\theta')$ " =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(o)$  é definida pelo comportamento de propensão ao risco do decisor.

$$U(o) = e^{-0,15x} \text{ Equação 3.16}$$

As utilidades dos modos de falha para a dimensão financeira são apresentados na tabela 3.22

Tabela 3.22- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Downtime (horas)	U(o)	U <sub>o</sub> (θ', MF <sub>ni</sub> )
MF <sub>11</sub>	2,5	0,20687	0,80172
MF <sub>22</sub>	4	0,00772	0,80154
MF <sub>32</sub>	4,2	0,06755	0,81351
MF <sub>43</sub>	3	0,01355	0,84217
MF <sub>54</sub>	3,5	0,07154	0,80502
MF <sub>64</sub>	3,7	0,01715	0,77394
MF <sub>74</sub>	3,5	0,00492	0,80098
MF <sub>85</sub>	5	0,00161	0,98403

MF <sub>96</sub>	-	1	1
MF <sub>107</sub>	-	1	1
MF <sub>118</sub>	-	1	1
MF <sub>98</sub>	5	0,04516	0,96181
MF <sub>128</sub>	-	1	1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Calculo dimensão operacional sem interrupções: Nesta dimensão é avaliado o *downtime* do modo de falha, sabendo que a ocorrência da falha não tem repercussões na continuidade da operação, mas pode implicar complicações graves no futuro de não ter feito a manutenção.

O valor da  $U_o'(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\square(\theta')$ " =  $1 - \square(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o'(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(o')$  é definida pelo comportamento de propensão ao risco do decisor.

$$U(o') = e^{-0,15x} \text{ Equação 3.17}$$

As utilidades dos modos de falha para a dimensão financeira são apresentados na tabela 3.23

Tabela 3.23- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas na operação

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Downtime (horas)	U(o')	$U_o'(\theta', MF_{ni})$
MF <sub>11</sub>	-	1	1
MF <sub>22</sub>	-	1	1
MF <sub>32</sub>	-	1	1
MF <sub>43</sub>	-	1	1
MF <sub>54</sub>	-	1	1
MF <sub>64</sub>	-	1	1
MF <sub>74</sub>	-	1	1
MF <sub>85</sub>	-	1	1
MF <sub>96</sub>	2	0,03180	0,75795
MF <sub>107</sub>	2,5	0,03811	0,74991
MF <sub>118</sub>	1	0,21829	0,96873

MF <sub>98</sub>	-	1	1
MF <sub>128</sub>	5	0,00033	0,95002

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O seguinte passo do processo de tomada de decisão que após dos cálculos das utilidades, consiste em calcular a função multiatributo. Nesta etapa é considerada a escolha de consequências feita pelo decisor dada a ocorrência de falhas utilizando loterias 50-50 entre o melhor e pior caso para cada caso.

As constantes de escala são estabelecidas com base nos procedimentos de elicitación baseado na comparação de loterias (KEENEY & RAIFFA, 1976). Os valores obtidos foram: K1=0,4, K2=0,3, K3=0,2, K4=0,07, K5=0,03.

Após de definir as constantes de escalas, são calculadas as utilidades mutiatributo para cada modo de falha de acordo com a equação 3.4. Os Valores obtidos são descritos na tabela 3.24 Para facilitar a interpretação, é feita uma conversão de escala para as utilidades.

Tabela 3.24- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	U (h,e,f,o,o’)	Conversão de Escala
MF <sub>11</sub>	0,84908	0,00000
MF <sub>22</sub>	0,88293	0,23105
MF <sub>32</sub>	0,88976	0,27770
MF <sub>43</sub>	0,93774	0,60512
MF <sub>54</sub>	0,91398	0,44301
MF <sub>64</sub>	0,91184	0,42837
MF <sub>74</sub>	0,92817	0,53982
MF <sub>85</sub>	0,99559	1,00000
MF <sub>96</sub>	0,87664	0,18811
MF <sub>107</sub>	0,92097	0,49067
MF <sub>118</sub>	0,98920	0,95638
MF <sub>98</sub>	0,96583	0,79689
MF <sub>128</sub>	0,97478	0,85793

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Na tabela 3.25 é estabelecido o *ranking* dos modos de falha para ser priorizados no planejamento da manutenção após da conversão feita para as utilidades, considerando a conversão de escala dentro de um intervalo entre [0,1] para as utilidades, onde “0” representa o valor menos preferível e “1” o valor mais preferível.

Neste contexto é evidenciado que o modo de falha MF11 é o mais crítico para ser priorizado, com uma utilidade de “0” na conversão de escala, pelo que deve ser o primeiro em ser considerado para os planos de manutenção pois representa as consequências menos preferível para o decisor O modo de falha MF85 é o modo de falha menos crítico para o decisor com uma utilidades de “1”.

Tabela 3.25- *Ranking dos valores da função utilidades multiatributo para cada modo de falha*

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	U(h,e,f,o,o')	Conversão de escala
MF11	0,849075626	0
MF96	0,876636759	0,18811
MF22	0,882927872	0,23105
MF32	0,889763066	0,27770
MF64	0,9118384	0,42837
MF54	0,91398318	0,44301
MF107	0,920966612	0,49067
MF74	0,928168386	0,53982
MF43	0,937735392	0,60512
MF98	0,965832335	0,79689
MF128	0,974776371	0,85793
MF118	0,989200061	0,95638
MF85	0,99559162	1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Uma comparação dos incrementos dos valores das utilidades dos modos de falha é possível através dos valores do *ranking* da função utilidade multiatributo. Os resultados desta comparação são apresentados na tabela 3.26, onde RI significa razão de incremento.

Analisando a tabela 3.26 com os resultados das diferenças dos modos de falha, pode-se ver que as maiores diferenças se encontram entre o modo de falha MF43 e MF98 com uma

diferença de “0,19177” e entre os modos de falha MF11 e MF96 com uma diferença de “0,18811”, isto quer dizer que existe um incremento “3,14171” vezes do MF43 para o MF98 e um incremento de “4,38076” vezes do MF11 para o MF96. Também evidencia-se que existe um incremento significativo de “10,2917” vezes do modo de falha MF32 para o modo de falha MF64, ou seja, entre eles existe uma diferença de “0,15067” entre os valores das utilidades.

Tabela 3.26- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha

Posição no ranking "r <sub>i</sub> "	Modo de Falha" MF <sub>ni</sub> "	U(MF <sub>ni</sub> )	$\frac{U(MF_{ni})r_i - U(MF_{ni})r_{i+1}}{U(MF_{ni})r_{i+1}}$	$\frac{RI = (U(MF_{ni})r_i - U(MF_{ni})r_{i+1}) / (U(MF_{ni+1}) - U(MF_{ni})r_{i+2})}{U(MF_{ni})r_{i+2}}$
1	MF11	0	0,18811	4,38076
2	MF96	0,18811	0,04294	0,92047
3	MF22	0,23105	0,04665	0,30962
4	MF32	0,27770	0,15067	10,2917
5	MF64	0,42837	0,01464	0,30718
6	MF54	0,44301	0,04766	0,969685
7	MF107	0,49067	0,04915	0,75268
8	MF74	0,53982	0,0653	0,34051
9	MF43	0,60512	0,19177	3,14171
10	MF98	0,79689	0,06104	0,62001
11	MF128	0,85793	0,09845	2,25699
12	MF118	0,95638	0,04362	-
13	MF85	1	-	-

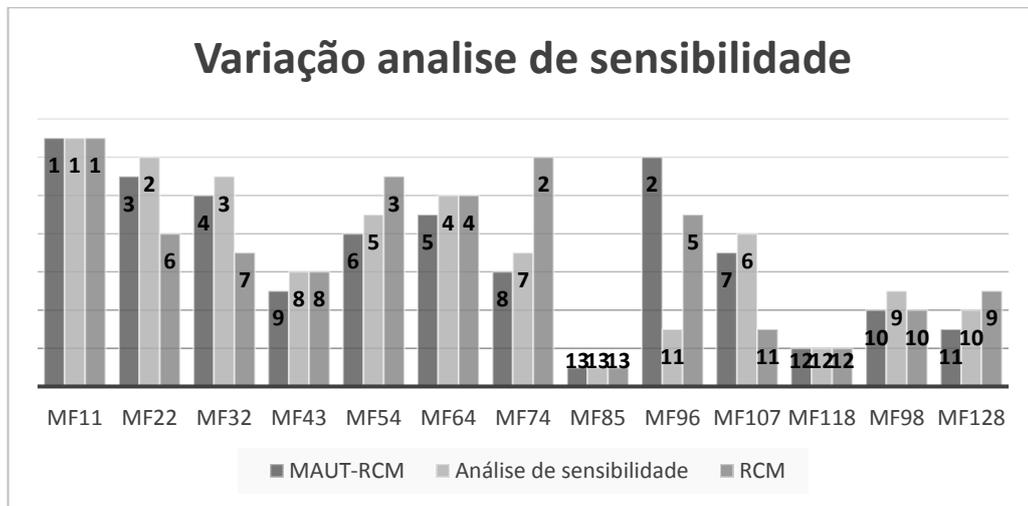
Fonte: Esta pesquisa (2017)

### 3.2.2.1 Análise de sensibilidade

É realizado um análise de sensibilidade baseado nos parâmetros considerados para verificar a robustez do modelo aplicado.

Para o primer cenário do análise de sensibilidade foram consideradas mudanças nos valores dos parâmetros, assumindo valores iguais para as constantes de escala das dimensões consideradas, encontrando-se variações na ordem de priorização dos modos de falhas. O modo de falha MF11, MF32, MF85, MF118 e 128 continuam nas mesmas posições na ordem de

priorização. Os outros modos de falha apresentarem mudanças após feito o análise, sendo eles sensíveis aos câmbios nos valores das constantes de escala.



*Figura 3.5 Variação análise de sensibilidade-cenário*  
*Fonte: Esta pesquisa (2017)*

Os resultados evidenciam que o procedimentos pode garantir os resultados obtidos da aplicação do modelo ao decisor.

### 3.2.3 Aplicação numérica 3

Para esta aplicação são considerados “i” modos de falhas ( $MF_n$ ) com suas probabilidades de ocorrência “ $\pi(\theta)_{MF}$ ”, um único usuário e 5 dimensões para a estimação das consequências (humana, ambiental, financeira, operacional com e sem interrupção da operação).

As dimensões são consideradas com independência preferencial, pois mudanças em uma delas não altera as preferências do decisor, neste sentido, é considerada uma função utilidade aditiva de acordo com Keeney e Raiffa, 1976.

Esta aplicação está baseado no estudo de caso feito por Maheswaran e Loganathan (2013) para a priorização de modos de falha para uma caldeira de uma indústria de fabricação de pneus, utilizando os métodos AHP, PROMETHEE e RCM.

Para a priorização utilizando a abordagem clássico do RCM, foi considerado para a etapa de análises dos efeitos de falha a ferramenta FMEA, onde foram avaliados a ocorrência, detectabilidade e severidade dos modos de falha (OxDxS), para estabelecer a criticidade de cada um deles.

As escalas para a avaliação da ocorrência, detectabilidade e severidade foram estabelecidas de acordo com a avaliação apresentada para o estudo de caso feito Maheswaran e Loganathan (2013) e são apresentadas nas tabelas 3.27, 3.28 e 3.29.

Ocorrência: Frequência da falha

*Tabela 3.27- Escala para avaliação de Ocorrência*

Ocorrência	Descrição	Score
Extremo	Mais de um por dia / a cada 1 a 2 dias	10, 9
Muito alto	Um por cada 2-4 dias / por cada semana	8, 7
Alto	Um por cada 1-2 semanas / 2-4 semanas / por mês	6, 5, 4
Moderado	Um por cada 1 a 3 meses / 3 a 6 meses	3, 2
Baixo	Uma ocorrência por mais de um ano	1

*Fonte: Adaptado de Maheswaran e Loganathan (2013)*

Detectabilidade: Probabilidade de detecção da falha

*Tabela 3.28- Escala para avaliação de Detectabilidade*

Detectabilidade	Descrição	Score
Extremo	Possibilidade extrema para o sistema detectar a falha	9
Muito alto	Possibilidade muito alta para o sistema detectar a falha	7
Alto	Possibilidade alta para o sistema detectar a falha	5
Moderado	Possibilidade moderada para o sistema detectar a falha	3
Baixo	Baixa possibilidade para o sistema detectar a falha	1

*Fonte: Adaptado de Maheswaran e Loganathan (2013)*

Severidade: Efeito da falha sobre o sistema

*Tabela 3.29- Escala para avaliação de Severidade*

Severidade	Descrição	Score
Extremo	Extremamente nocivo ao meio ambiente e causa fatalidades	9
Muito alto	Altamente nocivo para o ambiente e lesões graves aos seres humanos	7
Alto	Moderadamente nocivo para o ambiente, e lesões moderadas aos seres humanos	5
Moderado	Pouco prejuízo para o meio ambiente e para seres humanos	3
Baixo	Muito baixo efeito, nenhum dano ao meio ambiente ou em seres humanos	1

*Fonte: Adaptado de Maheswaran e Loganathan (2013)*

Aplicando o método RCM clássico para a avaliação das criticidades dos modos de falha e considerando as avaliações feitas no estudo de caso feito por Maheswaran e Loganathan (2013) para os critérios de ocorrência, detectabilidade e severidade, para a avaliação das criticidades dos modos de falha são obtidos os resultados que são apresentados na tabela 3.30, onde os modos de falha são priorizados de acordo com a criticidade que representam para a normalidade da operação.

*Tabela 3.30- Ranking da criticidade dos modos de falha utilizando o método RCM*

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Ocorrência	Severidade	Detectabilidade	Criticidade	Ranking
Parada do ventilador de sucção (MF1)	7	7	4	196	2
Falha da bomba de água de alimentação (MF2)	4	6	7	168	3
Válvula de segurança não funciona (MF3)	2	8	1	16	9
Falha do bocal no sistema de alimentação de combustível (MF4)	5	6	2	60	7
Baixa temperatura do óleo do forno (MF5)	6	8	5	240	1
Porta de segurança não funciona (MF6)	2	7	1	14	10
Falha de eléctrodo no sistema de ignição (MF7)	7	6	2	84	5
Falha do controlador de nível de água (MF8)	4	7	3	84	6
Ruptura do tubo de água de alimentação (MF9)	2	6	8	96	4
Falha no separador de vapor (MF10)	2	7	2	28	8

*Fonte: Adaptado de Maheswaran e Loganathan (2013)*

Os valores das probabilidades de ocorrência são considerados com base nos intervalos propostos por Maheswaran e Loganathan (2013) na escala de a avaliação da ocorrência dos modos de falha.

Tabela 3.31- Modos de falha e probabilidades de ocorrência

Modo de Falha “MF <sub>i</sub> ”	Modo de Falha	“ $\pi(\theta)_{MF}$ ”
MF1	Parada do ventilador de sucção	0,142857143
MF2	Falha da bomba de água de alimentação	0,066667
MF3	A válvula de segurança não funciona	0,005556
MF4	Falha do bocal no sistema de alimentação de combustível	0,047619
MF5	Baixa temperatura do óleo do forno	0,033333
MF6	Porta de segurança não funciona	0,005556
MF7	Falha de eléctrodo no sistema de ignição	0,142857143
MF8	Falha do controlador de nível de água	0,066667
MF9	Ruptura do tubo de água de alimentação	0,005556
MF10	Ocorre uma falha no separador de vapor	0,005556

Fonte: Adaptado de Maheswaran e Loganathan (2013)

Para cada dimensão considerada são calculadas as utilidades unidimensionais e o conjunto de consequências, os valores das consequências foram considerados baseados nas avaliações da severidade dos modos de falha no estudo de caso proposto por Maheswaran e Loganathan (2013) e o conhecimento de especialista.

- Calculo dimensão humana: O valor da  $U_h(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ”=  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_h(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(h)$  é definida pelo comportamento do decisor. A função utilidade  $U(h)$  é definida pelo comportamento de aversão ao risco do decisor.

$$U(h) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^{2,5} \text{ Equação 3.18}$$

Tabela 3.32- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	No. De pessoas atingidas	U(h)	Uh(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF1	12	0,427567	0,918223
MF2	6	0,898807	0,993254
MF3	15	0	0,994444
MF4	8	0,792271	0,990108
MF5	9	0,721145	0,990705
MF6	1	0,998852	0,999994
MF7	0	1	1
MF8	9	0,721145	0,981409
MF9	0	1	1
MF10	1	0,998852	0,999994

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Cálculo dimensão ambiental: O valor da  $U_a(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ” =  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_a(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(a)$  é definida pelo comportamento neutral ao risco do decisor.

$$U(e) = -0,0025x + 1 \text{ Equação 3.19}$$

Tabela 3.33- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Área atingida (m <sup>2</sup> )	U(e)	Ue(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF1	50	0,88	0,9821429
MF2	0	1,00	1
MF3	100	0,75	0,9986111
MF4	150	0,63	0,9821429
MF5	200	0,50	0,9833333
MF6	0	1,00	1
MF7	0	1,00	1
MF8	300	0,25	0,95
MF9	20	0,95	0,9997222
MF10	30	0,93	0,9995833

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Calculo dimensão financeira: O valor da  $U_f(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ”=  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_f(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(f)$  é definida pelo comportamento de aversão ao risco do decisor.

$$U(f) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^2 \text{ Equação 3.20}$$

Tabela 3.34-Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Prejuízos financeiros (\$R)	U(f)	$U_f(\theta', MF_{ni})$
MF1	1250	0,972222	0,9960317
MF2	250	0,998889	0,9999259
MF3	750	0,99	0,9999444
MF4	2500	0,888889	0,9947090
MF5	5000	0,555556	0,9851852
MF6	250	0,998889	0,9999938
MF7	750	0,99	0,9985714
MF8	7500	0	0,9333333
MF9	625	0,993056	0,9999614
MF10	1250	0,972222	0,9998457

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Calculo dimensão operacional (O): Esta dimensão considera os efeitos da falha para o normal funcionamento da operação, considerando que se existe a falha a operação deve parar durante o tempo de reparo, a medida deste tempo está dada pelo *downtime*.

O valor da  $U_o(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ”=  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(o)$  é definida pelo comportamento de propensão ao risco do decisor.

$$U(o) = e^{-0,025x} \text{ Equação 3.21}$$

Tabela 3.35- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Downtime (horas)	U(o)	Uo(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF1	12	0,01188	0,85884
MF2	6	0,00005	0,93334
MF3	24	0,00000	0,99444
MF4	6,5	0,04457	0,95450
MF5	-	1,00000	1,00000
MF6	5	0,12397	0,99513
MF7	8	0,01006	0,85858
MF8	7,5	0,02543	0,93503
MF9	8	0,03575	0,99464
MF10	24	0,00001	0,99444

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Calculo dimensão operacional sem interrupções: Nesta dimensão é avaliado o *downtime* do modo de falha, sabendo que a ocorrência da falha não tem repercussões na continuidade da operação, mas pode implicar complicações graves no futuro de não ter feito a manutenção.

O valor da  $U_o'(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ”=  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o'(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(o')$  é definida pelo comportamento do decisor.

Tabela 3.36- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Downtime (horas)	U(o')	Uo'(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF1	-	1	1
MF2	-	1	1
MF3	-	1	1
MF4	-	1	1
MF5	4	0,291158	0,97637
MF6	-	1	1
MF7	-	1	1
MF8	-	1	1
MF9	-	1	1
MF10	-	1	1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O seguinte passo do processo de tomada de decisão que após dos cálculos das utilidades, consiste em calcular a função multiatributo. Nesta etapa é considerada a escolha de consequências feita pelo decisor dada a ocorrência de falhas utilizando loterias 50-50 entre o melhor e pior caso para cada caso. As constantes de escala são estabelecidas com base nos procedimentos de elicitación baseado na comparação de loterias (KEENEY & RAIFFA, 1976). Os valores obtidos foram:  $K_1=0,3$ ,  $K_2=0,25$ ,  $K_3=0,2$ ,  $K_4=0,13$ ,  $K_5=0,12$ .

Após de definir as constantes de escalas, são calculadas as utilidades mutiatributo para cada modo de falha de acordo com a equação 3.4. Os Valores obtidos são descritos na tabela 3.37 Para facilitar a interpretação, é feita uma conversão de escala para as utilidades.

*Tabela 3.37- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha*

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	U(h,a,f,o,o')	Conversão de escala
MF1	0,95186	0
MF2	0,98930	0,78805
MF3	0,99725	0,95556
MF4	0,98560	0,71017
MF5	0,98725	0,74492
MF6	0,99936	1
MF7	0,98133	0,62037
MF8	0,96014	0,17440
MF9	0,99923	0,99710
MF10	0,99914	0,99530

*Fonte: Esta pesquisa (2017)*

O *ranking* estabelecido dos modos de falha para ser priorizados no planejamento da manutenção após a conversão de escala é verificado na tabela 3.38, considerando esta conversão de escala dentro de um intervalo entre [0,1] para as utilidades, onde “0” representa o valor menos preferível e “1” o valor mais preferível. Neste contexto é evidenciado que o modo de MF1 o mais crítico para ser priorizado, com uma utilidade de “0” na conversão de escala, pelo que deve ser o primeiro em ser considerado para os planos de manutenção pois representa as consequências mais críticas para o decisor.

Tabela 3.38- Ranking dos valores da função multiatributo para cada modo de falha

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	U(h,a,f,o,o')	Conversão de escala
MF1	0,951858	0
MF8	0,960143	0,174397
MF7	0,981329	0,620372
MF4	0,985595	0,710167
MF5	0,987246	0,744921
MF2	0,989295	0,788045
MF3	0,997253	0,955555
MF10	0,999141	0,995299
MF9	0,999226	0,99710
MF6	0,999364	1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Para o análises do *ranking*, é possível uma comparação dos incrementos dos valores das utilidades dos modos de falha é possível através dos valores da função utilidade multiatributo. Os resultados desta comparação são apresentados na tabela 3.39, onde RI significa razão de incremento.

Com os resultados da tabela 3.39 pode-se estabelecer que as maiores diferenças se encontram entre o modo de falha MF8 e MF7 com uma diferença de "0,445975" e entre o modo de falha MF3 e MF10 com uma diferença de "0,039744", isto quer dizer que existe um incremento "4,966621" vezes do MF8 para o MF7 e um incremento de "22,05921" de MF3 para MF10.

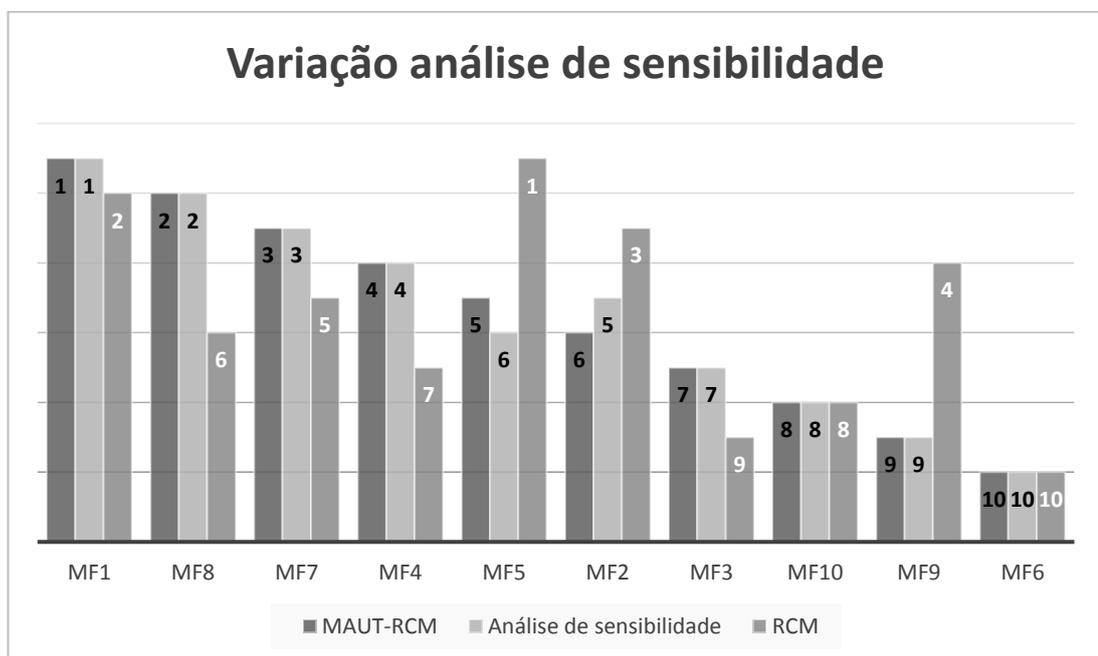
Tabela 3.39- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha

Posição no ranking "r <sub>i</sub> "	Modo de Falha "MF <sub>i</sub> "	U(MF <sub>i</sub> )	U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i</sub></sub> -U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i+1</sub></sub>	RI= (U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i</sub></sub> -U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i+1</sub></sub> )/(U(MF <sub>i+1</sub> ) <sub>r<sub>i+1</sub></sub> -U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i+2</sub></sub> )
1	MF1	0	0,174397	0,391047
2	MF8	0,174397258	0,445975	4,966621
3	MF7	0,620372442	0,089794	2,583686
4	MF4	0,710166937	0,034754	0,805913
5	MF5	0,744921356	0,043124	0,25744387
6	MF2	0,788045663	0,167509	4,214728
7	MF3	0,955555207	0,039744	22,05921
8	MF10	0,995299061	0,00180	0,621433
9	MF9	0,99710075	0,00289	-
10	MF6	1	-	-

Fonte: Esta pesquisa (2017)

É realizado um análise de sensibilidade baseado nos parâmetros considerados para verificar a robustez do modelo aplicado. Os resultados evidenciam que o procedimentos pode garantir os resultados obtidos da aplicação do modelo ao decisor.

Para o análise foram assumidos valores iguais para as constantes de escala das dimensões consideradas, encontrando-se variações na ordem de priorização de alguns modos de falhas. O modo de falha MF1 continua na primeira posição para ser priorizado. Os modos de falha MF8, MF7, MF4 e MF2 apresentarem mudanças de uma posição após feito o análise, sendo eles sensíveis aos câmbios nos valores das constantes de escala.



*Figura 3.6 Variacção análise de sensibilidade*  
*Fonte: Esta pesquisa (2017)*

#### 3.2.4 Aplicação numérica 4

Para esta aplicação são considerados “i” equipamento e “n” modos de falhas ( $MF_{ni}$ ) para cada um deles, com suas probabilidades de ocorrência “ $\pi(\theta)_{MF}$ ”, um único usuário e 5 dimensões para a estimação das consequências (humana, ambiental, financeira, operacional com e sem interrupção da operação).

As dimensões são consideradas com independência preferencial, pois mudanças em uma delas não alteras as preferências do decisor, neste sentido, é considerada uma função utilidade aditiva de acordo com Keeney e Raiffa, 1976.

Esta aplicação está baseado no estudo de caso feito por Mohsen e Fereshteh (2016) para a avaliação do risco dos modos de falha em uma usina geotérmica usando uma extensão do método VIKOR baseado na medida de entropia

Para a priorização utilizando a abordagem clássico do RCM, foi considerado para a etapa de análises dos efeitos de falha a ferramenta FMEA, onde foram avaliados a ocorrência, detectabilidade e severidade dos modos de falha (OxDxS), para estabelecer a criticidade de cada um deles.

As escalas para a avaliação da ocorrência, detectabilidade e severidade foram estabelecidas de acordo com a avaliação apresentada para o estudo de caso feito Mohsen e Fereshteh (2016) e são apresentadas nas tabelas 3.40, 3.41 e 3.42.

Aplicando o método RCM clássico para a avaliação das criticidades dos modos de falha e considerando as avaliações feitas no estudo de caso feito por Mohsen e Fereshteh (2016) para os critérios de ocorrência, detectabilidade e severidade, para a avaliação das criticidades dos modos de falha são obtidos os resultados que são apresentados na tabela 3.43, onde os modos de falha são priorizados de acordo com a criticidade que representam para a normalidade da operação.

*Tabela 3.40- Escala para avaliação de Ocorrência*

Ocorrência	Descrição	Score
Extremamente alto: falha quase inevitável	> em 2	10
Muito alto	1 em 3	9
Falhas repetidas	1 em 8	8
Alto	1 em 20	7
Moderadamente alta	1 em 80	6
Moderado	1 em 400	5
Relativa	1 em 2000	4
Baixo	1 em 15000	3
Remota	1 em 150000	2
Quase impossível	< 1 em 1500000	1

*Fonte: adaptado de Mohsen e Fereshteh (2016)*

Tabela 3.41- Escala para avaliação de Detectabilidade

Detectabilidade	Descrição	Score
Incerteza absoluta	A ocorrência potencial de modo de falha não pode ser detectada no conceito, projeto e processo FMEA / mecanismo e modo de falha subsequente	10
Muito remoto	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo de modo de falha é muito remoto / mecanismo e modo de falha subsequente	9
Remoto	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo de modo de falha é remota / mecanismo e modo de falha subsequente	8
Muito baixo	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo de falha do modo de falha é muito baixo / mecanismo e subsequente modo de falha	7
Baixo	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo do modo de falha é baixo / mecanismo e modo de falha subsequente	6
Moderado	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo do modo de falha é moderada / mecanismo e modo de falha subsequente	5
Altamente moderado	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo do modo de falha é moderadamente alta / mecanismo e modo de falha subsequente	4
Alto	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo do modo de falha é alta / mecanismo e modo de falha subsequente	3
Muito alto	A possibilidade de detectar o potencial ocorrendo de modo de falha é muito alto / mecanismo e modo de falha subsequente	2
Quase certo	O potencial ocorrendo do modo de falha será detecção / mecanismo e subsequente modo de falha	1

Fonte: adaptado de Mohsen e Fereshteh (2016)

Tabela 3.42- Escala para avaliação de Severidade

Severidade	Descrição	Score
Perigoso sem aviso prévio	Classificação de gravidade mais alta de um modo de falha, ocorrendo sem aviso e consequência é perigoso	10
Perigoso com aviso	Maior classificação de gravidade do modo de falha ocorrido com aviso, consequência é perigoso	9
Extremo	A operação do sistema ou produto é discriminada sem comprometer a segurança	8
Maior	A operação do sistema ou produto pode ser continuada, mas o desempenho do sistema ou produto é afetado	7
Significativo	A operação do sistema ou produto é continuada e o desempenho do sistema ou produto é degradado	6
Moderado	O desempenho do sistema ou produto é afetado seriamente e a manutenção é necessária	5
Baixo	O desempenho do sistema ou produto é pequeno afetado e a manutenção pode não ser necessária	4
Menor	Desempenho e satisfação do sistema com menor efeito	3
Muito menor	Desempenho e satisfação do sistema com ligeiro efeito	2
Nenhum	Sem efeito	1

Fonte: adaptado de Mohsen e Fereshteh (2016)

Tabela 3.43- Ranking da criticidade dos modos de falha utilizando o método RCM

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Ocorrência	Severidade	Detectabilidade	Criticidade	Ranking
Válvulas de fechamento (MF11)	3	8	3	72	19
Vazamento de válvula de globo(MF21)	7	3	3	63	22
Tubulações bloqueadas (MF31)	5	4	7	140	8
Discos de válvula usados (MF41)	4	5	5	100	13
Falha nas armadilhas (MF51)	8	5	8	320	2
Tubulações obstruídas (MF61)	9	3	3	81	17

Degradação da qualidade do vapor (MF71)	9	5	2	90	14
Problemas de escala (MF81)	9	9	3	243	4
Problemas de corrosão (MF91)	8	8	2	128	10
Escalas do rotor e laminas do diafragma (MF102)	7	4	5	140	9
Humidade e corrosão (MF112)	7	3	5	105	11
Válvulas aderidas (MF122)	3	7	4	84	15
Vibração do rotor (MF132)	4	7	3	84	16
Enrocamento de tubos de condensador (MF142)	3	4	6	72	20
Bloqueio dos bicos (MF153)	7	4	7	196	6
Aletas de torre de resfriamento obstruídas (MF163)	8	5	7	280	3
Quebra de vedação da bomba de água (MF173)	3	5	7	105	12
Vibração do rotor (MF134)	3	8	3	72	21
Bobinas de estator soltas (MF184)	3	7	3	63	23
Arcos ou engrenagens do interruptor (MF194)	5	5	2	50	24
Falha do motor (MF204)	9	4	6	216	5
Falha do transformador (MF214)	8	3	6	144	7
Danos no cobre do H <sub>2</sub> S (MF225)	4	4	2	32	25
Sinal de controle errado (MF235)	8	6	8	384	1
Falha do relé de proteção (MF245)	3	5	5	75	18

Fonte: adaptado de Mohsen e Fereshteh (2016)

Para os valores ausentes das consequências dos modos de falha no artigo base feito por Mohsen e Fereshteh (2016), foram considerados dados fictícios mas realistas em cada dimensão (humana, ambiental, financeira, operacional com interrupção na operação e operacional sem interrupção na operação) para realizar a aplicação do modelo multicritério.

Tabela 3.44- Modos de falha e probabilidades de ocorrência

Equipamento “i”	Modo de Falha “MF <sub>i</sub> ”	“ $\pi(\theta)_{MF}$ ”
Produção e transmissão	Válvulas de fechamento (MF11)	0,0000667
	Vazamento de válvula de globo(MF21)	0,05
	Tubulações bloqueadas (MF31)	0,0025
	Discos de válvula usados (MF41)	0,0005
	Falha nas armadilhas (MF51)	0,125
	Tubulações obstruídas (MF61)	0,3333333
	Degradação da qualidade do vapor (MF71)	0,3333333
	Problemas de escala (MF81)	0,3333333
	Problemas de corrosão (MF91)	0,125
Turbina e auxiliares	Escalas do rotor e lâminas do diafragma (MF102)	0,05
	Humidade e corrosão (MF112)	0,05
	Válvulas aderidas (MF122)	0,0000667
	Vibração do rotor (MF132)	0,0005
	Enrocamento de tubos de condensador (MF142)	0,0000667
Refrigeração e sistema de extração	Bloqueio dos bicos (MF153)	0,05
	Aletas de torre de resfriamento obstruídas (MF163)	0,125
	Quebra de vedação da bomba de água (MF173)	0,0000667
Gerador e sistema elétrico	Vibração do rotor (MF134)	0,0000667
	Bobinas soltar do estator (MF184)	0,0000667
	Arcos ou engrenagens do interruptor (MF194)	0,0025
	Falha do motor (MF204)	0,3333333
	Falha do transformador (MF214)	0,125
Instrumentação e sistema de controle	Danos no cobre do H2S (MF225)	0,0005
	Sinal de controle errado (MF235)	0,125
	Falha do relé de proteção (MF245)	0,0000667

Fonte: adaptado de Mohsen e Fereshteh (2016)

Para cada dimensão considerada são calculadas as utilidades unidimensionais e o conjunto de consequências, os valores das consequências foram considerados baseados nas

avaliações da severidade dos modos de falha no estudo de caso proposto por Mohsen e Fereshteh (2016) simulando os valores ausentes das consequências para cada dimensão.

- Cálculo dimensão humana: O valor da  $U_h(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ” =  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_h(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(h)$  é definida pelo comportamento do decisor. A função utilidade  $U(h)$  é definida pelo comportamento de aversão ao risco do decisor.

$$U(h) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^{3,5} \text{ Equação 3.22}$$

Tabela 3.45- Número de pessoas atingidas e valores da função utilidade da dimensão humana

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	No. De pessoas atingidas	U(h)	U <sub>h</sub> (θ', MF <sub>ni</sub> )
MF11	15	0	0,999933333
MF21	1	0,9999235	0,999996175
MF31	0	1	1
MF41	3	0,9964223	0,9999982
MF51	4	0,9902076	0,9987759
MF61	1	0,9999235	0,9999745
MF71	3	0,9964223	0,998807
MF81	10	0,7580751	0,9193584
MF91	3	0,9964223	0,9995528
MF102	3	0,9964223	0,9998211
MF112	1	0,9999235	0,9999962
MF122	4	0,9902076	0,9999993
MF132	3	0,9964221	0,9999982
MF142	5	0,9786167	0,9999986
MF153	3	0,9964223	0,9998211
MF163	2	0,9991345	0,9998918
MF173	7	0,9305737	0,9999954
MF134	3	0,9964223	0,9999998
MF184	6	0,9595228	0,9999973
MF194	0	1	1
MF204	5	0,9786167	0,9928722
MF214	7	0,9305737	0,9913217
MF225	1	0,9999235	0,9999999
MF235	0	1	1
MF245	8	0,8892113	0,9999926

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Cálculo dimensão ambiental: O valor da  $U_a(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\pi(\theta')$ " =  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_a(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(a)$  é definida pelo comportamento neutral ao risco do decisor.

$$U(e) = -0,01x + 1 \text{ Equação 3.23}$$

Tabela 3.46- Área atingida e valores da função utilidade da dimensão ambiental

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Área atingida (m <sup>2</sup> )	U(e)	Ue(θ', MF <sub>ni</sub> )
MF11	100	0	0,999933
MF21	40	0,6	0,98
MF31	20	0,8	0,9995
MF41	10	0,9	0,99995
MF51	5	0,95	0,99375
MF61	15	0,85	0,95
MF71	25	0,75	0,916667
MF81	80	0,2	0,733333
MF91	60	0,4	0,925
MF102	50	0,5	0,975
MF112	10	0,9	0,995
MF122	10	0,9	0,999993
MF132	50	0,5	0,99975
MF142	20	0,8	0,999987
MF153	15	0,85	0,9925
MF163	0	1	1
MF173	20	0,8	0,999987
MF134	5	0,95	0,999997
MF184	15	0,85	0,99999
MF194	0	1	1
MF204	30	0,7	0,9
MF214	80	0,2	0,9
MF225	0	1	1
MF235	0	1	1
MF245	60	0,4	0,99996

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Cálculo dimensão financeira: O valor da  $U_f(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ” =  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_f(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(f)$  é definida pelo comportamento de aversão ao risco do decisor.

$$U(f) = 1 - \left( \frac{x}{\max(x)} \right)^{3,5} \quad \text{Equação 3.24}$$

Tabela 3.47-Prejuízos financeiros e valores da função utilidade da dimensão financeira

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Prejuízos financeiros (\$R)	U(f)	Uf(θ',MF <sub>ni</sub> )
MF11	10.000,00	0,959523	0,9999973
MF21	3.500,00	0,998973	0,9999487
MF31	2.000,00	0,999855	0,9999996
MF41	3.000,00	0,999401	0,9999997
MF51	4.000,00	0,998362	0,9997952
MF61	2.000,00	0,999855	0,9999517
MF71	4.500,00	0,997526	0,9991752
MF81	25.000,00	0	0,6666667
MF91	20.000,00	0,542053	0,9427567
MF102	8.000,00	0,981464	0,9990732
MF112	3.000,00	0,999401	0,9999701
MF122	12.000,00	0,923379	0,9999949
MF132	10.000,00	0,959523	0,9999798
MF142	4.500,00	0,997526	0,9999998
MF153	2.500,00	0,999684	0,9999842
MF163	3.000,00	0,999401	0,9999252
MF173	5.500,00	0,995006	0,9999997
MF134	12.000,00	0,923379	0,9999949
MF184	9.000,00	0,972006	0,9999981
MF194	7.000,00	0,988384	0,9999710
MF204	8.500,00	0,977082	0,9923607
MF214	10.000,00	0,959523	0,9949404
MF225	8.000,00	0,981464	0,9999907
MF235	15.000,00	0,832687	0,9790859
MF245	10.000,00	0,959523	0,9999973

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Calculo dimensão operacional (O): Esta dimensão considera os efeitos da falha para o normal funcionamento da operação (paradas) e está dada pelo *downtime*. O valor da  $U_o(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde “ $\pi(\theta')$ ”=  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o(\theta', MF_{ni})=1$ . A função utilidade  $U(o)$  é definida pelo comportamento de propensão ao risco do decisor.

$$U(o) = e^{-0,15x} \text{ Equação 3.25}$$

Tabela 3.48- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	Downtime (horas)	U(o)	U <sub>o</sub> (θ', MF <sub>ni</sub> )
MF11	3	0,13099	0,99994
MF21	3,5	0,00983	0,95049
MF31	-	1	1
MF41	3	0,01355	0,99951
MF51	2	0,26730	0,90841
MF61	-	1	1
MF71	3	0,00502	0,66834
MF81	4	0,00380	0,66793
MF91	5	0,01006	0,87626
MF102	-	1	1
MF112	-	1,00000	1
MF122	4	0,06813	0,99994
MF132	-	1	1
MF142	-	1	1
MF153	-	1	1
MF163	-	1	1
MF173	4,5	0,04826	0,99994
MF134	1,5	0,44904	0,99996
MF184	2	0,00002	0,99993
MF194	2	0,00002	0,99750
MF204	4	0,00088	0,66696
MF214	3	0,00085	0,87511
MF225	-	1	1
MF235	3,5	0,00066	0,87508
MF245	3	1	1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

- Calculo dimensão operacional sem interrupções: Nesta dimensão é avaliado o *downtime* do modo de falha, sabendo que a ocorrência da falha não tem repercussões na continuidade da operação.

O valor da  $U_o'(\theta, MF_{ni})$ , é obtida pela equação (3.4) onde " $\pi(\theta')$ " =  $1 - \pi(\theta)$ . A situação mais preferível é o fato de não ocorrência do modo de falha, para a qual o valor da utilidade é  $U_o'(\theta', MF_{ni}) = 1$ . A função utilidade  $U(o')$  é definida pelo comportamento do decisor.

Tabela 3.49- Downtime e valores da função utilidade da dimensão operacional com paradas da operação

Modo de Falha "MF <sub>ni</sub> "	Downtime (horas)	U(o')	U <sub>o'</sub> (θ', MF <sub>ni</sub> )
MF11	-	1	1
MF21	-	1	1
MF31	2	0,29498	0,99824
MF41	-	1	1
MF51	-	1	1
MF61	1	0,00040	0,66680
MF71	-	1	1
MF81	-	1	1
MF91	-	1	1
MF102	3	0,03621	0,95181
MF112	2,5	0,13802	0,95690
MF122	-	1	1
MF132	4	0,00063	0,99950
MF142	3,5	0,03416	0,99994
MF153	2	0,29498	0,96475
MF163	1,5	0,00662	0,87583
MF173	-	1	1
MF134	-	1	1
MF184	-	1	1
MF194	-	1	1
MF204	-	1	1
MF214	-	1	1
MF225	2	0,00002	0,99950
MF235	-	1	1
MF245	4	0,00048	0,99993

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O seguinte passo do processo de tomada de decisão que após dos cálculos das utilidades, consiste em calcular a função multiatributo. As constantes de escala são estabelecidas com base nos procedimentos de elicitación baseado na comparação de loterias (KEENEY & RAIFFA, 1976). Os valores obtidos foram:  $K_1=0,35$ ,  $K_2=0,25$ ,  $K_3=0,2$ ,  $K_4=0,13$ ,  $K_5=0,07$ .

Após de definir as constantes de escalas, são calculadas as utilidades multiatributo para cada modo de falha de acordo com a equação 3.4. Os Valores obtidos são descritos na tabela 3.50. Para facilitar a interpretação, é feita uma conversão de escala para as utilidades.

*Tabela 3.50- Valores da função utilidade multiatributo para os modos de falha*

Modo de Falha “MF <sub>ni</sub> ”	U(h,a,f,o,o’)	Conversão de escala
MF11	0,99995	0,99980
MF21	0,98855	0,94411
MF31	0,99975	0,99882
MF41	0,99992	0,99966
MF51	0,98606	0,93195
MF61	0,96416	0,82495
MF71	0,93547	0,68481
MF81	0,79527	0,00000
MF91	0,95356	0,77318
MF102	0,99013	0,95181
MF112	0,99573	0,97915
MF122	0,99999	0,99998
MF132	0,99990	0,99953
MF142	0,99999	0,99999
MF153	0,99559	0,97850
MF163	0,99126	0,95732
MF173	0,99999	0,99997
MF134	0,99999	1,00000
MF184	0,99999	0,99997
MF194	0,99967	0,99842
MF204	0,92768	0,64678
MF214	0,95471	0,77883
MF225	0,99996	0,99985
MF235	0,97958	0,90028
MF245	0,99998	0,99995

*Fonte: Esta pesquisa (2017)*

O *ranking* estabelecido dos modos de falha para ser priorizados no planejamento da manutenção após a conversão de escala é verificado na tabela 3.51, considerando esta conversão de escala dentro de um intervalo entre [0,1] para as utilidades, onde “0” representa o valor menos preferível e “1” o valor mais preferível. Neste contexto é evidenciado que o modo de MF1 o mais crítico para ser priorizado, com uma utilidade de “0” na conversão de escala, pelo que deve ser o primeiro em ser considerado para os planos de manutenção pois representa as consequências mais críticas para o decisor.

*Tabela 3.51- Ranking dos valores da função multiatributo para cada modo de falha*

Modo de Falha “MF <sub>mi</sub> ”	U(h,a,f,o,o’)	Conversão de escala
MF81	0,795273	0
MF204	0,927682	0,646781
MF71	0,935468	0,684814
MF91	0,953558	0,773178
MF214	0,954715	0,778826
MF61	0,964157	0,824952
MF235	0,979578	0,900276
MF51	0,986062	0,931948
MF21	0,988552	0,944114
MF102	0,99013	0,951815
MF163	0,991255	0,957316
MF153	0,995592	0,978499
MF112	0,99573	0,979154
MF194	0,99967	0,998417
MF31	0,999752	0,998819
MF132	0,999898	0,999534
MF41	0,999923	0,999655
MF11	0,999952	0,999798
MF225	0,999963	0,999853
MF245	0,999982	0,999946
MF173	0,999987	0,999968
MF184	0,999988	0,999972
MF122	0,999989	0,999979
MF142	0,999992	0,999992
MF134	0,999993	1

*Fonte: Esta pesquisa (2017)*

Para o análises do *ranking*, é possível uma comparação dos incrementos dos valores das utilidades dos modos de falha é possível através dos valores da função utilidade multiatributo. Os resultados desta comparação são apresentados na tabela 3.52, onde pode-se estabelecer que as maiores diferenças se encontram entre o modo de falha MF3 e MF10 com uma diferença de “0,040332”, isto quer dizer que existe um incremento “30,55312” vezes do MF3 para o MF10.

Tabela 3.52- Comparação dos valores das utilidades e razões entre os modo de falha

Posição no ranking "r <sub>i</sub> "	Modo de Falha" MF <sub>i</sub> "	U(MF <sub>i</sub> )	U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i</sub></sub> -U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i+1</sub></sub>	RI= (U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i</sub></sub> -U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i+1</sub></sub> )/(U(MF <sub>i+1</sub> ) <sub>r<sub>i+1</sub></sub> -U(MF <sub>i</sub> ) <sub>r<sub>i+2</sub></sub> )
1	MF81	0	0,646781	17,00578445
2	MF204	0,646781	0,038033	0,430412838
3	MF71	0,684814	0,088364	15,64518414
4	MF91	0,773178	0,005648	0,12244721
5	MF214	0,778826	0,046126	0,612367904
6	MF61	0,824952	0,075324	2,378252084
7	MF235	0,900276	0,031672	2,60332073
8	MF51	0,931948	0,012166	1,579794832
9	MF21	0,944114	0,007701	1,399927286
10	MF102	0,951815	0,005501	0,259689374
11	MF163	0,957316	0,021183	32,34045802
12	MF153	0,978499	0,000655	0,034003011
13	MF112	0,979154	0,019263	47,91791045
14	MF194	0,998417	0,000402	0,562237762
15	MF31	0,998819	0,000715	5,909090909
16	MF132	0,999534	0,000121	0,846153846
17	MF41	0,999655	0,000143	2,6
18	MF11	0,999798	0,000055	0,591397849
19	MF225	0,999853	0,000093	4,227272727
20	MF245	0,999946	0,000022	5,5
21	MF173	0,999968	0,000004	0,571428571
22	MF184	0,999972	0,000007	0,538461538
23	MF122	0,999979	0,000013	1,625
24	MF142	0,999992	0,000008	-
25	MF134	1	-	-

Fonte: Esta pesquisa (2017)

É realizado um análise de sensibilidade baseado nos parâmetros considerados para verificar a robustez do modelo aplicado. Os resultados evidenciam que o procedimentos pode garantir os resultados obtidos da aplicação do modelo ao decisor.

Para o análise foram considerados valores iguais para as constantes de escala das dimensões consideradas, encontrando-se variações na ordem de priorização doze dos vinte e cinco modos de falha. O modo de falha MF81 continua na primeira posição para ser priorizado. O modo de falha MF134 aumenta uma posição na ordem de priorização após ser feito a mudança nos valores das constantes de escala. Pode-se dizer que os a ordem de priorização dos modos de falha são sensíveis aos câmbios nos valores das constantes de escala.

### Variacão análise de sensibilidade

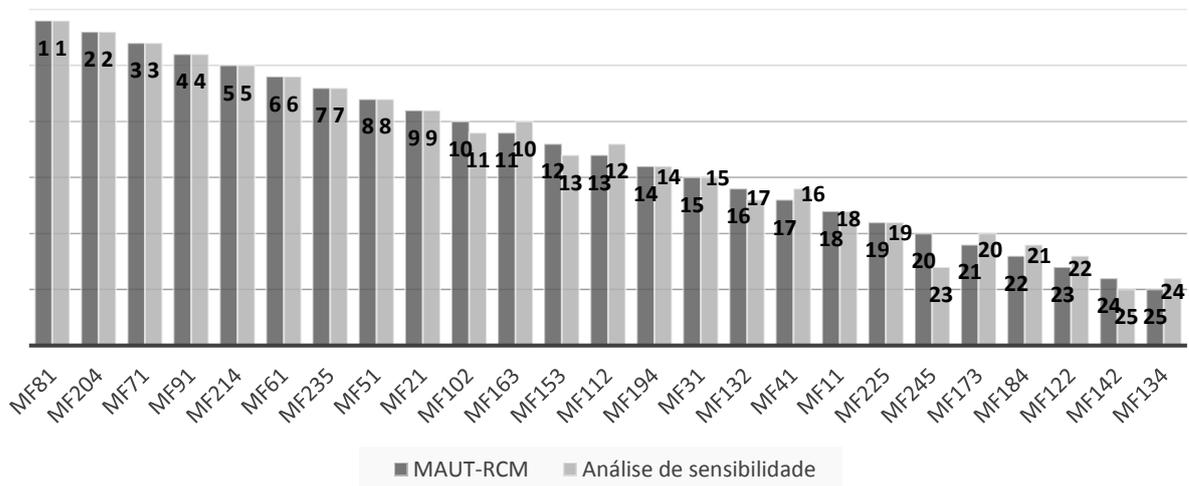


Figura 3.7 Variacção análise de sensibilidade  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

### 3.3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na aplicação do modelo proposto por Alencar & Almeida (2015) são estabelecidas cinco dimensões considerando as consequências dos modos de falhas evidenciadas na abordagem RCM, realizando algumas modificações que serão descritas para a melhor adaptação às necessidades que podem ter nas indústrias.

As consequências associadas ao critério segurança na abordagem RCM foi separada em duas dimensões, humana e ambiental, dado que de fato, estas dimensões devem ser medidas separadamente e não de forma integrada como observado na abordagem tradicional do RCM. Desta forma é possível avaliar as consequências das falhas com a devida importância que

representa para a sociedade, pois estas consequências podem ter diferentes avaliações dependendo da localização da planta. Além disso, permite quantificar de forma mais apropriada os impactos dos eventos indesejados na saúde das pessoas (quantidade de pessoas afetadas) e o possível impacto ambiental no entorno da planta industrial em análise.

A dimensão financeira considera todos os custos que na abordagem RCM são avaliados em mais de uma categoria, assim são adicionados numa única dimensão os custos relacionados a reparos e multas pagas aos clientes.

Nas dimensões operacionais é considerado o *downtime* para realizar a avaliação pois ele considera além do tempo necessário para realizar a reparação, a definição do pessoal para efetuar o reparo e o teste da máquina. Estas dimensões são separadas para analisar os efeitos na continuidade da operação, na primeira situação a operação é interrompida pelo modo de falha durante o tempo em que ele deve ser reparado, na segunda situação a existência do modo de falha não interrompe a normalidade da operação, mas deve ser feita a manutenção para evitar consequências graves futuras.

Na aplicação do modelo é feita a comparação do *ranking* para a priorização de modos de falha obtidos com o método multicritério através dos resultados da avaliação da criticidade dos modos de falha feita com a abordagem clássica do RCM.

Para a primeira aplicação numérica são evidenciadas as variações nas posições no *ranking* para priorização dos modos de falha, encontrando-se, por exemplo, uma mudança no primeiro modo de falha que deve ser priorizado. O modo de falha MF35 que ocupava a terceira posição com o método RCM, passa ser o primeiro modo de falha a ser priorizado de acordo com o modelo MAUT-RCM. O modo de falha MF43 passa da posição oito no *ranking* RCM para a posição nove no modelo MAUT-RCM. Na figura 3.7 podem-se observar as variações nas posições

No geral, para este caso, as mudanças são entre uma e duas posições podendo ser consideradas como ajustes ao modelo RCM ao utilizar valores quantitativos e as preferências do decisor, permitindo uma avaliação mais objetiva em relação as consequências dos modos de falha e a importância que representam para o decisor.

## Variação da posição no Ranking - Caso 1

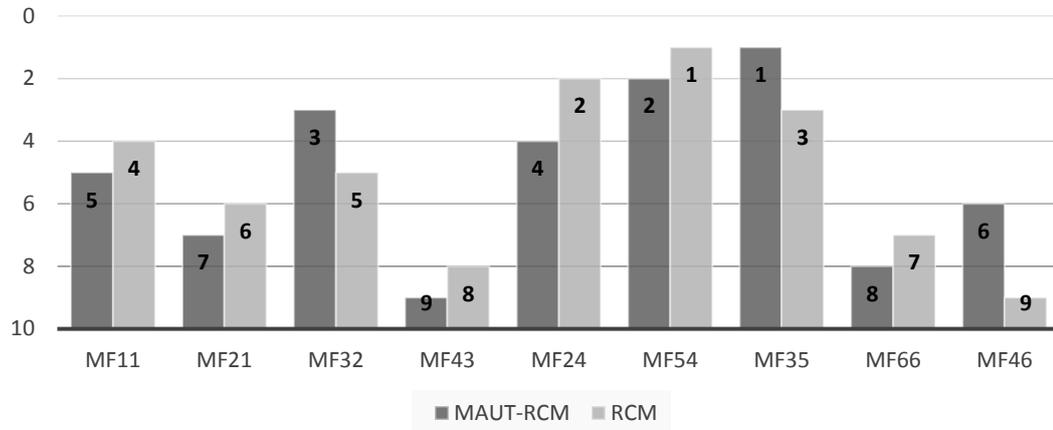


Figura 3.8 Gráfico de variação de posição, Caso 1  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Analisando a figura 3.8 onde são apresentadas as variações na posição do *ranking* para o caso 2, pode-se verificar que o modo de falha MF11 representa para o método MAUT e para a abordagem clássica RCM o mais crítico em termos de prioridade. Neste caso são evidenciados variações de máximo 3 posições, o que se deve ao fato de ter dados quantitativos referentes às perdas dada a ocorrência do modo de falha.

## Variação da posição no Ranking - Caso 2

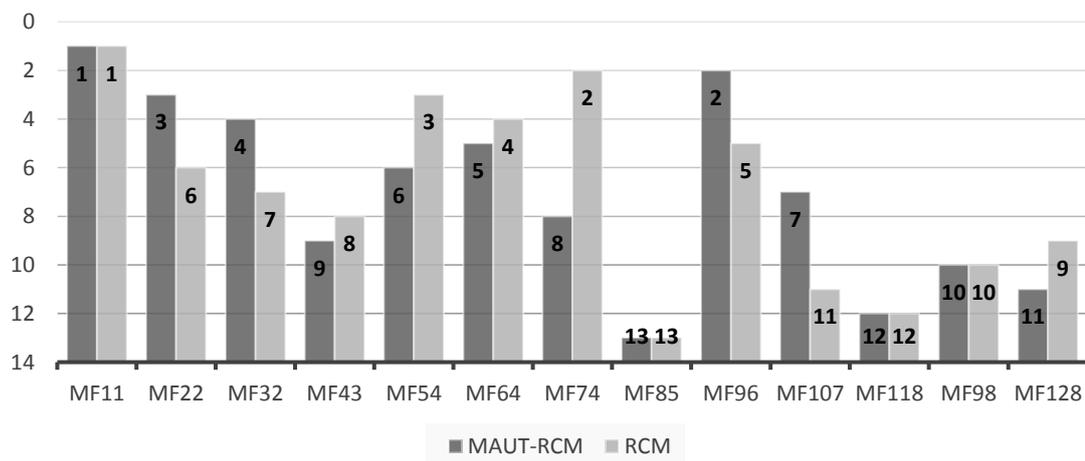


Figura 3.9 Gráfico de variação de posição, Caso 2  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Na figura 3.9 se encontram os resultados das posições no *ranking* dos modos de falha de acordo com as aplicações dos modelos MAUT-RCM e RCM para o caso 3. No gráfico pode-se

observar que para o modelo MAUT-RCM o primeiro modo de falha que deve ser priorizado é o MF1, sendo que, para o modelo RCM este se encontra na posição dois na ordem de priorização. No caso do MF6, este representa para os dois modelos o modo de falha de menor importância na ordem de priorizações.

### Variação da posição no Ranking - Caso 3

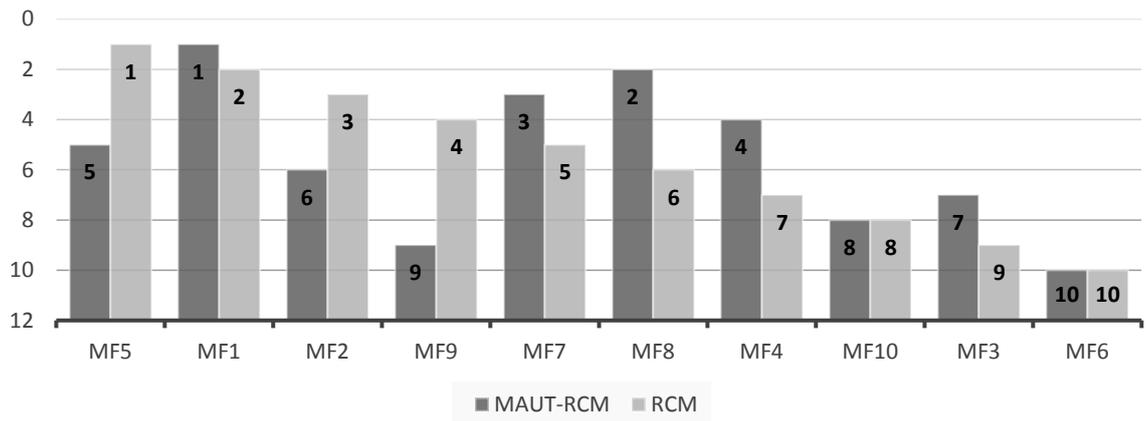


Figura 3.10 Gráfico de variação de posição, Caso 3  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Os resultados das posições dos modos de falha obtidos através do método MAUT-RCM e da abordagem clássica do RCM são apresentados na figura 3.11, onde pode-se observar que usando o método multicritério o modo de falha MF81 deve ser o primeiro em ser priorizado, sendo ele para a abordagem clássica RCM o quarto modo de falha que deve ser priorizado. No caso do modo de falha MF225 ele representa a menor criticidade na abordagem RCM, sendo ele o último na ordem de priorização; usando o método MAUT-RCM ele passa ao lugar dezanove para ser priorizado.

### Variação da posição no Ranking - Caso 4

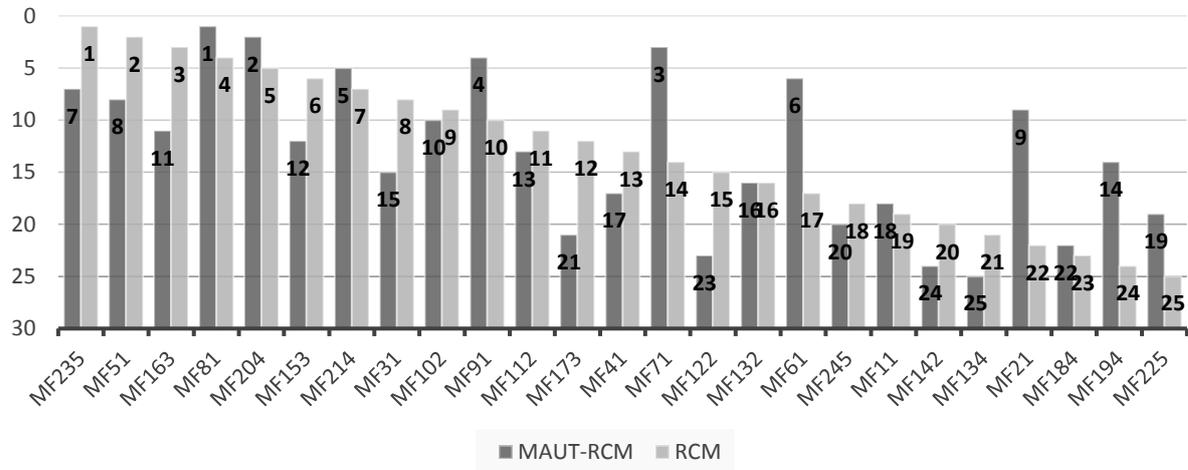


Figura 3.11 Gráfico de variação de posição, Caso 4  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Desta forma pode-se evidenciar que a inclusão das preferências dos decisores com uma avaliação quantitativa em relação às consequências dos modos de falha modifica a ordem deles para a realização dos planos de manutenção.

Após de revisar os resultados, pode-se destacar que a abordagem RCM permite um detalhamento e melhora no conhecimento dos sistemas dentro de uma operação para encontrar os modos de falha que podem afetar normal funcionamento do processo. Além disso, permite uma fácil classificação dos modos de falha de acordo com sua criticidade por conta da sua avaliação linguística que permite estabelecer uma escala de valores para os critérios de ocorrência, detectabilidade e severidade.

Através do RCM tradicional é possível estabelecer as tarefas de manutenção que devem ser feitas para os modos de falha que representam maior criticidade de acordo com sua avaliação nos três critérios considerados nesta abordagem.

Com base na abordagem RCM pode ser melhorado ao incorporar o método MAUT para a tomada de decisão nos programas de manutenção, incorporando a possibilidade de avaliar mais de três critérios, considerando as necessidades das organizações em termos das consequências que os modos de falha podem ocasionar no normal funcionamento das operações.

Com a inclusão do modelo MAUT é possível avaliar os modos de falha de acordo com as consequências que podem ocasionar em cinco dimensões (humana, ambiental, financeira,

operacional com interrupção e operacional sem interrupção), o que permite uma avaliação quantitativa em termos de perda. Com isto, o decisor pode estabelecer quais são suas preferências na priorização considerando as consequências que cada modo de falha pode trazer nas diferentes dimensões e seu comportamento frente a possibilidade de perda em cada uma das dimensões.

A avaliação dos modos de falha considerando múltiplos critérios permite estabelecer uma priorização mais objetiva, pois um modo de falha que representa um baixa criticidade por ser pouco provável sua ocorrência ao ser avaliado em termos das consequências no caso de ocorrer, pode representar o modo de falha mais crítico por seu impacto nas segurança das pessoas ou no ambiente. Além disso, ao tratar o problema considerando múltiplos critérios, é possível estabelecer as consequências em relação com muitas, aspectos legais e impactos interno na organização dada a ocorrência da falha.

## 4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 CONCLUSÕES

Para a priorização e planejamento da manutenção em plantas industriais, foi aplicado um modelo multicritério para a avaliação das consequências dos modos de falha obtidos através da abordagem RCM.

Na seleção do método multicritério foram considerados os doze passos propostos por De Almeida (2013), onde se estabelece MAUT como método para a avaliação das consequências de forma quantitativa em condições de incertezas. As dimensões consideradas são uma variação das propostas no modelo RCM, assim, a dimensão de segurança foi dividida em duas dimensões, humana e ambiental, pois para as indústrias as cobranças por cada umas de essas consequências são feitas de forma separada de acordo com leis e parâmetros existentes. A dimensão operacional foi dividida de acordo com o impacto dentro do processo produtivo, desta forma se consideram duas dimensões, operacional com interrupção e sem interrupção na operação.

Em relação aos cálculos das utilidades unidimensionais, é considerado o comportamento do decisor em relação ao risco para avaliar as preferências. Para o cálculo da função multiatributo foram consideradas as utilidades unidimensionais e as respectivas constantes de escala para cada dimensão.

Na aplicação numérica do modelo nos casos apresentados são estabelecidos um *ranking* de priorização dos modos de falha baseado nas preferencias do decisor em relação às consequências das dimensões. Este *ranking* é comparado com os resultados obtidos com a aplicação da abordagem clássica do RCM encontrando-se mudanças na ordem de priorização dos modos de falhas. De acordo com isto, pode-se considerada que a aplicação do modelo multicritério resulta em dados mais consistente, pois considera uma avaliação quantitativa para avaliar as consequências dada a ocorrência dos modos de falha.

No estabelecimento dos estudos de caso foram encontrados diferentes construções para a definir a criticidade dos modos de falha dentro da abordagem RCM, onde são criados *scores* paras as avaliações linguísticas dos critérios de severidade, ocorrência e detectabilidade.

A ferramenta FMEA usada no cálculo da criticidade permite estabelecer os valores das escalas de acordo com as necessidades específicas dos encarregados de realizar a avaliação. No caso da utilização do modelo multicritério, a priorização é realizada considerando as

consequências de cada modo de falha em cada critério e o comportamento do decisor no momento de escolher a ordem de importância dos critérios para a operação, desta forma é possível estabelecer a ordem de prioridades de acordo com as perdas que podem gerar os modos de falha em cada dimensão considerada.

Os dois modelos ainda dependem da subjetividade do decisor, no modelo multicritério no momento de realizar as avaliações das consequências dos modos de falha e na abordagem RCM na avaliação da criticidade dos modos de falha.

Com as aplicações feitas pode ser concluir que o modelo multicritério MAUT baseado na abordagem RCM usado para a priorização de modos de falha pode ser aplicado em diferentes tipos de indústrias, além disso, permite a inclusão e avaliação de múltiplos critérios que são relevantes para as organizações no momento de realizar o planejamento da manutenção.

#### 4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item são apresentadas sugestões para a elaboração de trabalhos futuros relacionados com a utilização de modelos de decisão multicritério com a abordagem RCM

- Desenvolver um modelo de decisão que incorpore a opção de decisão em grupo para os casos de mais de um decisor
- Desenvolver um sistema de apoio a decisão (SAD) para o processo de análise de sensibilidade
- Realizar uma análise mais profunda das consequências dos modos de falha, podendo considerar subdimensões para a avaliação das consequências.
- Desenvolver um modelo que incorpore veto de acordo com as restrições em de tempo ou orçamento que tem as indústrias

## REFERENCIAS

AL-NAJJAR, B.; ALSYOUF, I. *Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making*. Int. J. Production Economics, vol. 84, p. 85-100, 2003.

ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. *A Multicriteria Decision Model for Assesment of Failure Consequences in the RCM Approach*. Mathematical Problem in Engineering, vol. 2015, 2015.

ALSYOUF, I. *The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability*. Int. J. Production Economics, vol. 105, p. 70-78, 2007.

AZADEH, A.; ZADEH, S. A. *An integrated fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy multiple-criteria decision-making simulation approach for maintenance policy selection*. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, vol. 92, p. 3-18, 2016.

BELTON, V.; STEWART, T. J. *Multiple criteria decision analysis*. Kluwer Academic Publishers, 2002.

BERGER, J. O. *Statistical decision theory and Bayesian analysis*. 2. Rf. New York: Springer-Verlag, 1985.

BERTOLINI, M.; BEVILACQUA, M. *A combined goal programming-AHP approach to maintenance selection problem*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 91, p.839-848, 2006.

BEVILACQUA, M; BRAGLIA, M. *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 70, p. 71-83, 2000.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *Glossary of maintenance terms in Terotechnology*. London, 1984.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H.; LOPES, R. S. *Multicriteria Model to Support Maintenance Planning in Residencial Complexes under Warranty*. Journal of Construction Engineering Management, 2016

CAVALCANTE, C. A. V.; DE ALMEIDA, A. T. A. *A multi-criteria decision-aiding model using PROMETEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 13, p. 385-397, 2007

CAVALCANTE, C. A. V.; FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA, A. T. *A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach*. IMA Journal of Management Mathematics. p. 333-348, 2008.

CAVALCANTI, P. H.; GARCEZ, G. V.; DE ALMEIDA, A. T. *Análises multicritério da criticidade de modos de falha definidos com o auxílio da abordagem MCC*. XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. p.15-18, 2011.

CARRETERO J.; PÉREZ, J. M.; GARCÍA-CABELLEIRA, F.; CALDERÓN, A.; FERNANDEZ, J.; GARCÍA, J. D.; LOZANO, A.; CARDONA, L.; COTAINA, N.; PRETE, P. *Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks*. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 82, p. 257-273, 2003.

DE ALMEIDA, A. T. *Processo de Decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas: 2013.

DE ALMEIDA, A. T.; BOHORIS, G. A. *Decision theory in maintenance decision making*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 1, p. 39-45, 1995.

DE ALMEIDA, A. T.; CALVANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA FILHO, A. T.; GARCEZ, T. V. *Multicriteria and Multiobjective Model for Risk Reliability and Maintenance Decision Analysis*. New York: Springer, 2015.

DE ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, R. J. P.; CAVALCANTE, C. A. V. *A review of the use of multi-objective models in maintenance and reliability*. IMA Journal of Management Mathematics, vol. 2, p. 249-271, 2015.

DE ALMEIDA, A. T., SOUZA, F. C. M. *Gestão da manutenção na direção da Competitividade*. Recife: Editora Universitaria, 2001.

DEKKER, ROMMERT. *Applications of maintenance optimization models: a review and analysis*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 51 p.229-240, 1996.

DESHPANDE, R; V.S; MODAK, J.P. *Application of RCM to a medium scale industry*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 77, p. 31-43, 2002.

ETI, M.C.; OGAJI, S.O.T.; PROBERT, S.D.; *Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture*. Applied Energy, vol. 83 p. 1235-1248, 2006.

FISCHER, K.; BESNARD, F.; BERTLING, L. *Reliability-Centered Maintenance for Wind Turbines Based on Statistical Analysis and Practical Experience*. Transactions on Energy Conversion, vol. 27, p. 184-195.

FONSECA, D. J.; KNAPP, G. M. *An expert system for reliability centered maintenance in the chemical industry*. Expert System with Applications, vol. 19, p. 45-53, 2000.

JONES, R. B. *Risk – based management*. Mumbai, India: Jaico Publishing House, 1995.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. *Decision with multiple objectives: preference and value trade-off*. New York: John Wiley, 1976.

LI, C.; XU, M. *ELECTRE III Based on Ranking Fuzzy Numbers for deterministic and Fuzzy Maintenance Strategy Decision Problems*. International Conference on Automation and logistic. China, 2007.

LIU H.; LIU, L.; LIU, N. *Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review*. Expert Systems with Applications, vol. 40, p. 828-838, 2013

LOLLI, F.; ISHIZAKA, A.; GAMBERINI, R.; RIMINI, B.; MESSORI, M. *FlowSort-GDSS - A novel group multi-criteria decision support system for sorting problems with application to FMEA*. Expert System with Applications, vol.42, p. 6342-6349, 2015

MAHESWARAN, K.; LOGANATHAN, T. *A Novel Approach for Prioritization of Failure modes in FMEA using MCDM*. International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, p. 733-739, 2013.

MISHRA, R. P.; KODALI, R. B.; GUPTA, G.; MUNDRA, N. *Development of a framework for implementation of World-class Maintenance System using Interpretative Structural Modeling approach*. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, vol. 25 p. 424-429, 2015.

MOHSEN, O.; FERESHTEEN, N. *An extended VIKOR method based on entropy measure for the failure modes risk assessment – A case study of the geothermal power plant (GPP)*. Safety Science, vol. 92 p. 160-172.

MOREIRA, M. P.; DUPONT, C. G.; VELLASCO, M. M. B. R. *PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE Multicriteria Methods for Ranking Equipment Failure Modes*. Intelligent System Applications to Power System, 2009.

MOUBRAY, J. *Realibility-Centered Maintenance*. North Carolina: Industrial Press Inc., 1997.

NIU, G.; YANG, B.S.; PECHT, M. *Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusión and reliability-centered maintenance*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 95 p. 786-796, 2010.

NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. *Reliability-centred maintenance*. Tech. Rep. AD /A066-579, National Technical Information Service, US Department of Commerce, Springfield, Virginia, 1978.

PINJALA, S. K.; PINTELON, L.; VEREECKE, A. *An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies*. Int. J. Production Economics, vol. 104, p. 214–229, 2006.

RAUSAND, M. *Reliability centered maintenance*. Reliability Engineering and System Safety. vol. 60, p.121-132, 1998.

RAUSAND, M.; OIEN K. *The basic concept of failure analysis*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 53, p. 73-83, 1996.

ROY, B. *Multicriteria Methodology for decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers, 1996

SACHDEVA, A.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Multi-factor failure mode critically analysis using TOPSIS. Journal of Industrial Engineer International, vol. 5 p. 1-9, 2009.

SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V. *Modelling quality in replacement and inspection maintenance*. International Journal of Production Economics, vol. 135 p. 372-381, 2012

SELVIK, J.T.; AVEN, T. *A framework for reliability and risk centered maintenance*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 96 p. 324-331, 2011.

SIQUEIRA, I. P. de. *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005

SOUZA, F. M. C. *Decisões racionais em situações de incerteza*. Recife: Universitaria, 2002.

WANG, L., CHU, J., WU, J. *Selection of optimum maintenance strategies based on fuzzy analytic hierarchy process*. International journal of production economics, vol.107 p.151-163

ZELENY, M. *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York, 1982.