

4

Modelo de Decisão Multicritério

4.1

Introdução

Este Capítulo tem como objetivo propor um modelo de decisão multicritério para a priorização dos modos de falha de equipamentos identificados a partir de um processo RCM. O modelo proposto faz uso da metodologia PROMETHEE II, e da metodologia adaptada F-PROMETHEE, as quais foram detalhadas no capítulo anterior.

A construção do modelo de decisão foi feita de acordo com as seguintes etapas:

- Identificação das alternativas e determinação dos critérios de avaliação;
- Criação de um sistema de inferência fuzzy para a obtenção da severidade de cada modo de falha;
- Cálculo do risco associado a cada modo de falha;
- Implementação dos métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE, resultando em um sistema computacional para a priorização das alternativas a partir dos critérios pré-definidos.

Estas etapas são detalhas nas próximas seções deste capítulo.

4.2

Descrição do Modelo de Decisão Proposto

A estrutura do modelo é apresentada na Figura 13.

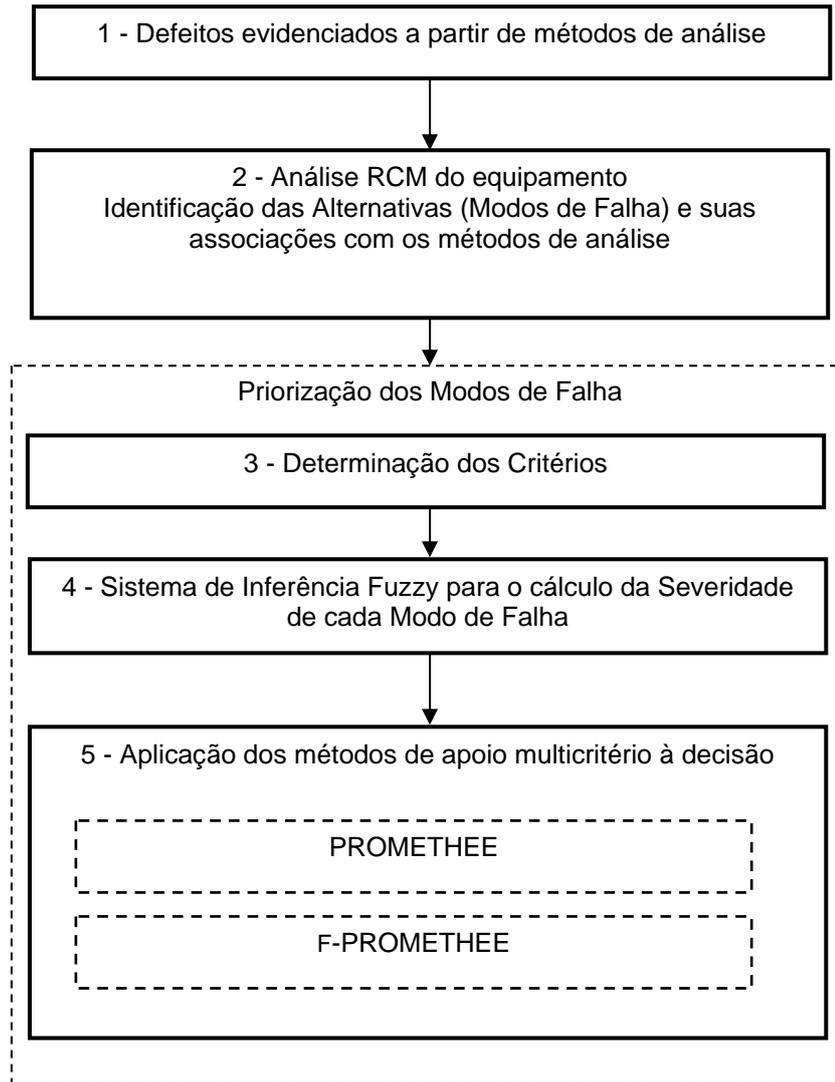


Figura 13 – Modelo para priorização de modos de falha

As etapas 1 e 2 do modelo representado na Figura 13 estão baseadas na metodologia sugerida por DUPONT (2003). Na etapa 1, são determinadas as evidências de defeitos possíveis de serem detectados nos equipamentos. Tais evidências são obtidas através de diferentes métodos de análise, os quais utilizam como entradas variáveis armazenadas em uma base relacional adquirida.

Conforme apresentado por DUPONT (2003), cada método de análise é especializado na identificação de um determinado defeito no equipamento analisado e irá retornar um “grau do defeito” e uma “confiança no grau do defeito” com valores entre 0 e 1. Poderão existir um ou vários métodos de análise para cada defeito. No caso de existirem vários métodos de análise para um determinado defeito, os graus e confianças retornados por eles serão ponderados

de acordo com a importância de cada método, de forma que para cada defeito será obtido um grau e uma confiança únicos associados a este defeito.

Os graus e confianças obtidos para diferentes tipos de defeitos que possam estar ocorrendo no equipamento serão utilizados como entradas na etapa 2 do modelo. Nesta etapa, através do processo RCM, identificam-se quais as possíveis causas (falha funcional + componente + modo de falha) estão relacionadas aos defeitos evidenciados pelos métodos de análise na etapa 1.

Desta forma, ao fazer a análise do equipamento em um determinado instante de tempo, serão identificadas evidências de defeitos, e associadas a cada evidência existirão várias causas.

Uma vez evidenciadas as causas, aplica-se a metodologia desenvolvida neste trabalho para priorizar os modos de falha, visando auxiliar a tomada de decisão na gestão da manutenção. Assume-se, portanto, como hipóteses deste trabalho, que o processo RCM tenha sido previamente aplicado e os modos de falha tenham sido identificados. As etapas 1 e 2 da Figura 13, não são, assim, foco deste trabalho.

Considerando-se o problema de priorização dos modos de falha como multicritério, após a identificação das alternativas (modos de falha) a partir das evidências de anormalidade (defeitos), é necessária a determinação dos critérios relevantes na solução do problema, representado na etapa 3 do modelo apresentado na Figura 13. Esta etapa é descrita na próxima seção deste trabalho.

4.3

Determinação dos Critérios

Segundo ROY (1996), chama-se critério uma “ferramenta” que permite comparar alternativas de acordo com um particular “eixo de significância” ou com um “ponto de vista”. Mais precisamente, um critério é uma função de valor real sobre um conjunto “A” de alternativas, tal que permita comparar duas alternativas a_1 e a_2 de acordo com um ponto de vista particular sobre uma base única entre dois números $g(a_1)$ e $g(a_2)$. Em um problema multicritério, os critérios devem representar de forma clara e correta o juízo de valores do decisor e devem ser determinados com base nos objetivos do decisor, envolvendo portanto, sua participação.

Na etapa 3 do modelo apresentado na Figura 13 realiza-se a determinação dos critérios de decisão, os quais irão avaliar os modos de falha que serão priorizados na etapa 5 pelos métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE.

Os critérios de avaliação utilizados neste trabalho foram:

1. Grau de ocorrência da causa (GO);
2. Confirmação da causa (CI);
3. Severidade dos impactos econômicos (SE);
4. Severidade dos impactos operacionais (SO);
5. Severidade dos impactos de segurança à vida humana (SS);
6. Severidade dos impactos ambientais (SA);
7. Risco (R).

A seguir detalha-se cada um destes critérios.

4.3.1

Grau de Ocorrência da Causa (GO)

A possibilidade de ocorrência (“O”) de cada causa representa a opinião do especialista com relação à seguinte questão:

Se a causa real da falha funcional ocorrida for a causa analisada, qual a possibilidade de que exista uma evidência de defeito com grau “G” igual a 1 dada pelo método de análise do defeito?

Para cada relacionamento *causa x método de análise*, o especialista avalia a possibilidade de ocorrência da causa respondendo a questão acima dentro de uma escala de 0 a 1, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 – Definição de “O” para cada causa x método de análise

Possibilidade de Ocorrência da Causa (O)	
Nunca ocorre	0
Quase nunca ocorre	0,01
Ocorre muito raramente	0,1
Ocorre raramente	0,25
Ocorre com uma frequência moderada	0,5
Ocorre frequentemente	0,75
Ocorre muito frequentemente	0,9
Ocorre quase sempre	0,99
Sempre ocorre	1

A partir dos graus de defeitos gerados pelos métodos de análise, os índices de “O” serão ponderados com a avaliação do especialista (Tabela 8) e será obtido um grau de possibilidade de ocorrência para cada causa ou simplesmente grau de ocorrência (GO).

4.3.2

Confirmação da Causa (CI)

A intensidade de confirmação “I” de cada causa representa a opinião do especialista com relação à seguinte questão:

Se ocorreu a falha funcional (método de análise do defeito indicando grau igual a 1) qual a possibilidade de que a causa analisada seja a responsável ?

Para cada relacionamento *causa x método de análise*, o especialista avalia a intensidade de confirmação da causa respondendo a questão acima dentro de uma escala de 0 a 1, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Definição de “I” para cada causa x método de análise

Intensidade de Confirmação da Causa (I)	
Nunca ocorre	0
Quase nunca ocorre	0,01
Ocorre muito raramente	0,1
Ocorre raramente	0,25
Ocorre com uma frequência moderada	0,5
Ocorre frequentemente	0,75
Ocorre muito frequentemente	0,9
Ocorre quase sempre	0,99
Sempre ocorre	1

A partir das confianças nos graus de defeitos gerados pelos métodos de análise, os índices de “I” são ponderados conforme a avaliação do especialista (Tabela 9), obtendo um grau de confirmação para a possibilidade de ocorrência para cada causa ou simplesmente confirmação da causa (CI).

O valor de CI representa a incerteza no valor do grau de ocorrência da causa. Conforme DUPONT (2003), esta incerteza pode ser representada por:

$$\text{erro} = 1 - \text{CI} \quad (30)$$

4.3.3

Severidade dos Impactos

A severidade é um indicativo numérico dos impactos negativos resultantes da ocorrência de cada modo de falha. SIQUEIRA (2005) define como possíveis escalas de severidade as apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Níveis de severidade
Fonte: SIQUEIRA 2005, p.101

Categoria	Severidade	Valor	Dano		
			Ambiental	Pessoal	Econômico
I	Catastrófico	5	Grande	Mortal	Total
II	Crítico	4	Significante	Grave	Parcial
III	Marginal	3	Leve	Leve	Leve
IV	Mínimo	2	Aceitável	Insignificante	Aceitável
V	Insignificante	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente

Onde cada categoria de efeito possui o seguinte significado:

- **Efeito Catastrófico**: quando a ocorrência da falha pode causar a morte de seres humanos, ou perda do sistema principal, ou grande dano ao meio ambiente.
- **Efeito Crítico**: quando a ocorrência da falha pode causar ferimento severo ou mesmo a morte, ou dano significativo ao sistema ou ao meio ambiente.

- **Efeito Marginal**: quando a ocorrência da falha pode causar ferimento leve ou dano de pequeno porte no sistema ou ao meio ambiente.
- **Efeito Mínimo**: quando a ocorrência da falha provoca conseqüências reduzidas na operação, meio ambiente e segurança, abaixo dos níveis máximos permitidos das normas legais, demandando recursos econômicos mínimos para a restauração à condição original.
- **Efeito Insignificante**: quando os efeitos provocados pela ocorrência da falha forem insuficientes para causar ferimentos em seres humanos, ou danos ao sistema, ou impactos no meio ambiente que infrinjam qualquer norma ambiental.

De acordo com LAFRAIA (2001), a severidade da ocorrência da falha é classificada de acordo com a Tabela 2. Como se pode observar na Tabela 2, este autor não considera explicitamente impactos econômicos, ambientais, nem de segurança à vida humana como é feito por SIQUEIRA (2005) na Tabela 10. Na classificação apresentada na Tabela 2, fala-se em deterioração no desempenho do sistema, riscos à segurança operacional, e descumprimento de requisitos legais. Para MOUBRAY (2000), um modo de falha tem conseqüência na segurança se causar uma perda da função ou um outro dano que poderia ferir ou matar alguém. A segurança refere-se à segurança do homem no seu local de trabalho. Para este mesmo autor, um modo de falha tem conseqüências ambientais se causar uma perda de função ou um outro dano que poderia levar a romper qualquer regulamento ou padrão ambiental conhecido, e terá conseqüências operacionais se houver um efeito adverso direto qualquer na capacidade operacional. Estas conseqüências são avaliadas em termos econômicos.

Como se pode observar, a avaliação da severidade dos modos de falha envolve uma grande complexidade, uma vez que vários aspectos devem ser analisados, e tais avaliações são fortemente dependentes da opinião do especialista autor da análise, agregando um alto grau de incerteza.

No modelo proposto nesta dissertação optou-se por avaliar as conseqüências dos modos de falha considerando-se os impactos econômicos, operacionais, de segurança pessoal e ambiental de forma independente.

A avaliação da severidade sob cada um dos impactos é dada por especialistas durante a aplicação do processo RCM, na etapa de identificação dos modos de falha.

A avaliação definida neste trabalho para cada modo de falha é, portanto, feita da seguinte forma:

- **Severidade dos Impactos Econômicos (SE)**

A severidade dos impactos econômicos de cada modo de falha representa a opinião do especialista com relação à seguinte questão:

O modo de falha tem algum efeito direto adverso na redução de vida útil remanescente do equipamento caso nenhuma manutenção (ação) imediata seja realizada?

O especialista avalia a severidade dos impactos econômicos de cada modo de falha respondendo à questão acima dentro de uma escala de 0 a 1, de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 – Avaliação da severidade dos impactos econômicos

Severidade dos impactos econômicos (SE)	
Severidade das conseqüências	Avaliação
Elevada redução de vida útil	5
	4
Moderada redução de vida útil	3
	2
Baixa ou insignificante redução de vida útil	1
	0

- **Severidade dos Impactos Operacionais (SO)**

A severidade dos impactos operacionais de cada modo de falha representa a opinião do especialista com relação à seguinte questão:

O modo de falha tem efeito direto adverso na disponibilidade ou qualidade de energia, ineficiência do processo caso nenhuma manutenção (ação) imediata seja realizada?

O especialista avalia a severidade dos impactos operacionais de cada modo de falha respondendo à questão acima dentro de uma escala de 0 a 1, de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 – Avaliação da severidade dos impactos operacionais

Severidade dos impactos operacionais (SO)	
Severidade das conseqüências	Avaliação
Perda de disponibilidade	5
Elevada deterioração no desempenho do sistema, afetando a qualidade de energia	4
Razoável deterioração no desempenho do sistema, afetando a qualidade de energia	3
Leves variações no desempenho do sistema	2
Conseqüências não afetam o desempenho do sistema	1 0

- **Severidade dos Impactos de Segurança à Vida Humana (SS)**

A severidade dos impactos de segurança à vida humana de cada modo de falha representa a opinião do especialista com relação à seguinte questão:

O modo de falha causa a perda da função ou outro dano que pode ferir ou matar alguém caso nenhuma manutenção (ação) imediata seja realizada?

Da mesma forma que nos casos anteriores, o especialista avalia a severidade dos impactos de segurança à vida humana de cada modo de falha respondendo a questão acima dentro de uma escala de 0 a 1, de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 – Avaliação da severidade dos impactos de segurança à vida humana

Severidade dos impactos de segurança à vida humana (SS)	
Severidade das conseqüências	Avaliação
Pode levar a morte de seres humanos ou ferimentos severos	5 4
Pode causar ferimentos leves	3 2
As conseqüências são reduzidas ou insuficientes para causar ferimentos	1 0

- **Severidade dos Impactos Ambientais (SA)**

A severidade dos impactos ambientais de cada modo de falha representa a opinião do especialista com relação à seguinte questão:

O modo de falha causa a perda da função ou outro dano que pode quebrar algum regulamento ou padrão ambiental conhecido caso nenhuma manutenção (ação) imediata seja realizada?

O especialista avalia a severidade dos impactos ambientais de cada modo de falha respondendo a questão acima dentro de uma escala de 0 a 1, de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 – Avaliação da severidade dos impactos ambientais

Severidade dos impactos ambientais (SA)	
Severidade das conseqüências	Avaliação
Grande dano ao meio ambiente ou infração de alguma lei ambiental	5
Dano significativo ao meio ambiente, porém sem infração de lei ambiental	4
Dano de pequeno porte ao meio ambiente	3 2
Danos ao meio ambiente insignificantes	1 0

Na etapa 4 do modelo representado na Figura 13, foi criado um sistema de inferência fuzzy para a obtenção da severidade global de cada modo de falha. Este sistema tem como entradas as severidades SE, SO, SS e SA, utilizadas como critérios de avaliação para a priorização dos modos de falha. A severidade global resultante do sistema de inferência é utilizada no cálculo do risco dos modos de falha. O risco também foi utilizado como um dos critérios de avaliação para a priorização dos modos de falha.

A última etapa do modelo é a aplicação dos métodos multicriteriais de apoio à decisão PROMETHEE e F-PROMETHEE para a priorização dos modos de falha.

As etapas 4 e 5 estão detalhadas nas próximas seções deste capítulo.

4.4

Sistema de Inferência Fuzzy

O sistema de inferência fuzzy aqui apresentado tem como finalidade a obtenção da severidade global de cada modo de falha. Este sistema foi criado utilizando-se o *Fuzzy Logic Toolbox* do software Matlab®. As variáveis de entrada deste sistema são as severidades analisadas sob os diferentes aspectos e definidas como critérios de avaliação no problema de priorização dos modos de falha. A severidade global obtida é utilizada para o cálculo do risco de cada modo de falha.

4.4.1

Modelagem do Sistema Fuzzy

Foi desenvolvido um sistema de inferência fuzzy para a obtenção da severidade de cada modo de falha, considerando, como entrada deste sistema, as severidades dos diferentes impactos anteriormente citadas. Este sistema pode ser visualizado na Figura 14.

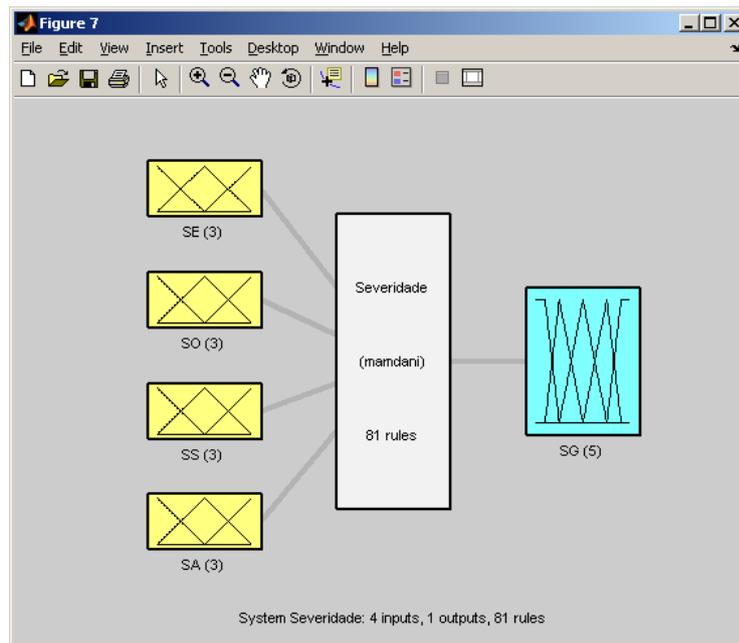


Figura 14 – Sistema fuzzy para o cálculo da severidade

O primeiro passo na modelagem do sistema fuzzy foi a identificação das variáveis de entrada e saída.

As variáveis de entrada foram definidas como:

1. Severidade dos impactos econômicos (SE);
2. Severidade dos impactos operacionais (SO);
3. Severidade dos impactos de segurança à vida humana (SS); e
4. Severidade dos impactos ambientais (SA).

A variável de saída foi definida como:

1. Severidade global (SG).

Uma vez identificadas as variáveis lingüísticas de entrada e saída, determinou-se para cada variável seu universo de discurso, e os respectivos conjuntos fuzzy.

Baseando-se nas Tabelas 11 a 14, foi feita a modelagem das variáveis de entrada do sistema de inferência, como pode ser visto na Tabela 15.

Tabela 15 – Modelagem das variáveis de entrada

Variáveis de Entrada	Universo de Discurso	Valores Lingüísticos
Severidade dos impactos econômicos (SE)	0-5	Baixo, Médio, Alto
Severidade dos impactos operacionais (SO)	0-5	Baixo, Médio, Alto
Severidade dos impactos de segurança à vida humana (SS)	0-5	Baixo, Médio, Alto
Severidade dos impactos de ambientais (SA)	0-5	Baixo, Médio, Alto

Os conjuntos fuzzy das variáveis de entrada são mostrados na Figura 15. Embora outras representações fossem possíveis, as funções de pertinência adotadas mostraram-se satisfatórias.

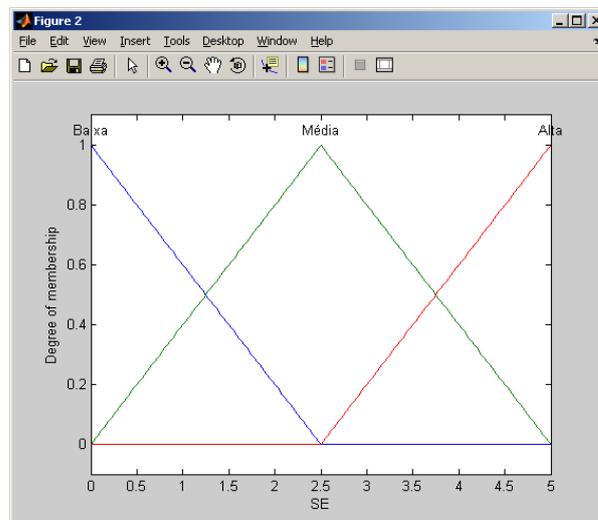


Figura 15 – Conjuntos fuzzy das variáveis de entrada

Conforme já mencionado, a variável de saída do sistema fuzzy é a severidade global de cada modo de falha. Esta variável apresenta um grau de 0 a 1, que reflete a intensidade dos diferentes impactos da ocorrência do modo de falha para a empresa. A modelagem desta variável é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Modelagem da variável de saída

Variável de saída	Universo de Discurso	Valores Lingüísticos
Severidade global (SG)	0-1	Insignificante, Mínima, Marginal, Crítica, Catastrófica

A Figura 16 mostra os conjuntos fuzzy da variável de saída.

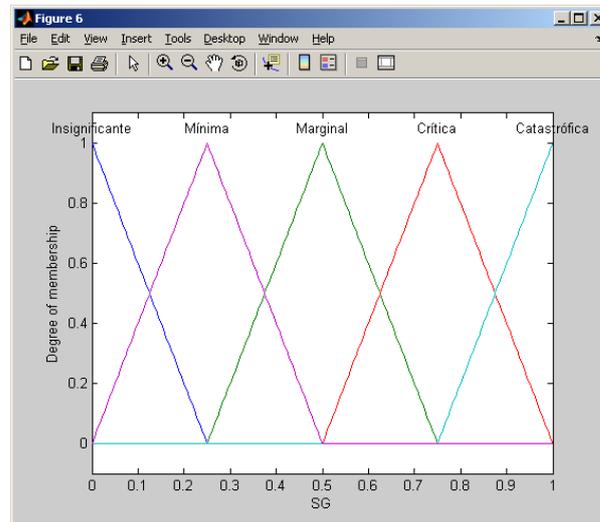


Figura 16 – Conjuntos fuzzy da variável de saída

A base de regras, constituída de 81 regras lingüísticas, foi construída a partir do conhecimento de especialistas, sendo apresentada no Apêndice 1.

4.5

Cálculo do Risco

A conseqüência de um modo de falha pode ser medida por uma avaliação de risco. Várias são as definições e as abordagens para riscos. BARALDI (2005) define riscos como os elementos incertos e as expectativas que agem sobre os meios estratégicos e o ambiente e que provocam os desastres financeiros e morais e, por conseqüência, se bem gerenciados, forçam a criatividade e fazem nascer as oportunidades. Para BOUMA et al (2005) risco é a probabilidade de ocorrência de um evento multiplicada pela conseqüência deste evento. O Risco, segundo LAFRAIA (2001), é uma ou mais condições de uma variável com potencial necessário para causar danos.

As definições de riscos devem ser ajustadas a cada tipo de empresa, considerando a sua visão, o significado de seus valores, os seus objetivos

estratégicos, o conhecimento e a experiência das pessoas e o ramo da indústria. Os riscos principais podem ser abertos em riscos componentes de determinados grupos. O que importa é a coerência e compreensão das definições e identificações dos riscos sempre em linha com os objetivos estratégicos da empresa e das áreas e seu gerenciamento integrado.

O gerenciamento de riscos é o centro dos objetivos estratégicos de qualquer empresa. O foco do gerenciamento de riscos é a identificação e o tratamento dos riscos. Uma definição mais atual para gerenciamento de riscos provém do “*Enterprise Risk Management Framework*” (ERM) do *Committee of Sponsoring Organization Treadway Commission (COSO)*: “...um processo, executado pela diretoria, gerência e demais profissionais, aplicado na definição das estratégias e na operação do negócio, desenhado para identificar os potenciais eventos que podem afetar a empresa, e que gerencie os riscos dentro do ambiente corporativo, para prover uma razoável certeza do alcance dos objetivos da entidade.”

A FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é um processo largamente utilizado para a análise de risco e de criticidade de um sistema, bem como no gerenciamento de riscos. Os riscos em uma FMEA podem ser quantificados através do conceito do RPN, conforme apresentado na equação (1).

Nesta dissertação o cálculo do risco de cada modo de falha será calculado conforme a equação (31).

$$\text{Grau de Risco} = (\text{Grau de Ocorrência}) \times (\text{Severidade}) \quad (31)$$

O risco será utilizado como um dos critérios de avaliação para a priorização dos modos de falha, no sistema descrito nas próximas seções deste capítulo.

4.6

Aplicação dos Métodos de Apoio Multicritério à Decisão

Os métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE foram utilizados neste trabalho para a priorização dos modos de falha de equipamentos. Para isto, foi criado um sistema computacional onde estes métodos foram implementados utilizando-se C++ Builder. A tela principal deste sistema pode ser visualizada na Figura 17.

The screenshot shows the main interface of the PROMETHEE software. On the left is a configuration panel with the following settings:

- Critério: S2
- MaxMin: (unchecked)
- Maximizar: (checked)
- Peso: 1
- Função de Preferência: V-Shape
- Limite de Indiferença:
- Limite de Preferência: 1
- Parâmetro da Gaussiana:
- Botão: Calcular

On the right, the 'Matriz de índices de Preferência' is displayed as a table with 10 alternatives (a1 to a10) and 4 criteria (S1, S2, S3, S4). The diagonal elements are all 1.0.

Alternativa	G0	C1	S1	S2	S3	S4
a1	1	0.35	0.85	1	0.2	0.5
a2	1	0.35	0.5	0.5	0.2	0.2
a3	0.25	0.15	1	0.7	0.85	0.9
a4	1	0.35	0.25	0.95	0.1	0.3
a5	0.17	0.32	1	1	0.9	0.8
a6	0.17	0.34	0.85	0.3	0.7	1
a7	0.14	0.32	0.85	0.4	1	0.7
a8	0.14	0.28	0.85	0.85	1	0.2
a9	0.11	0.28	1	0.2	0.1	0.8
a10	0.13	0.31	0.85	1	0.9	1

Figura 17 – Tela principal do programa computacional desenvolvido

Este sistema apresenta dois módulos, conforme pode ser visualizado na Figura 17. Um módulo corresponde à implementação do método PROMETHEE, o qual fornece como saída a priorização dos modos de falha conforme este método. O outro módulo corresponde à implementação do F-PROMETHEE, que, por sua vez, fornece a priorização dos modos de falha de acordo com este segundo método. Os resultados fornecidos pelos dois métodos podem ser visualizados simultaneamente, facilitando a comparação e a avaliação dos resultados.

O sistema lê as avaliações dos modos de falha sob cada um dos critérios pré-definidos a partir de um banco de dados. Estas avaliações são apresentadas na matriz de avaliações, conforme mostrado na Figura 17.

O sistema possui uma barra de configurações, conforme pode ser visualizado à esquerda na Figura 17, onde o decisor deverá configurar cada um dos critérios pré-definidos conforme descrito a seguir:

1. Definir se o critério deve ser maximizado ou minimizado (MaxMin)
2. Definição do peso deste critério (Peso): O decisor pode atribuir pesos aos critérios conforme sua preferência. Caso todos os critérios tenham a mesma importância, eles podem ter pesos iguais. Se algum critério pré-definido não for relevante para o decisor, ele poderá atribuir peso zero a este critério, e o mesmo não será considerado na priorização.

3. Definição da função de preferência ou critério de preferência (Função de Preferência): As funções de preferência programadas disponíveis ao decisor são as apresentadas na Tabela 7.
4. Definição dos parâmetros de decisão da função de preferência escolhida (Limite de Preferência e Limite de Indiferença): Dependendo da função de preferência escolhida (Tabela 6), deverão ser definidos pelo decisor os parâmetros de decisão: limites de preferência ou indiferença, ou parâmetro de gaussiana.

Após cada um dos critérios ter sido configurado pelo decisor, ao “clique” no botão “Calcular” (Figura 17), o programa apresentará a priorização dos modos de falha pelos métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE. O detalhamento da implementação de cada um destes métodos é apresentado a seguir.

4.6.1

PROMETHEE

A partir das configurações de cada critério pelo decisor, é calculada a matriz de índices de preferência ponderada para cada par de alternativas. A matriz de preferências é obtida a partir da equação (16) e pode ser vista em um exemplo arbitrário na Figura 18.

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	0	0.23	0.21	0.19	0.166	0.306	0.292	0.262	
a2	0	0	0.15	0.07	0.166	0.206	0.192	0.172	
a3	0.24	0.41	0	0.42	0.036	0.156	0.152	0.192	
a4	0	0.11	0.2	0	0.166	0.296	0.282	0.212	
a5	0.23	0.46	0.07	0.42	0	0.21	0.176	0.186	
a6	0.2	0.33	0.02	0.38	0.04	0	0.066	0.166	
a7	0.2	0.33	0.03	0.38	0.02	0.08	0	0.1	
a8	0.16	0.3	0.06	0.3	0.02	0.17	0.09	0	
a9	0.09	0.22	0	0.25	0	0.03	0.05	0.15	
	0.24	0.47	0.09	0.43	0.04	0.18	0.18	0.19	

Figura 18 – Exemplo de índices de preferência ponderada

A partir destes índices são calculados os fluxos de saída, fluxos de entrada e fluxo líquido para cada alternativa, de acordo com as equações (17), (18) e (19), respectivamente.

A partir do fluxo líquido, é estabelecida pelo PROMETHEE II uma classificação completa utilizando a relação de sobreclassificação apresentada na equação (22). Esta classificação pode ser visualizada na Figura 19.

Alternativa	S1	S2	S3	S4	GO	CI	FI_PROMETHEEII
a10	0.85	1	0.9	1	0.13	0.35	0.1654
a5	1	1	0.9	0.8	0.17	0.35	0.1631
a3	1	0.7	0.85	0.9	0.25	0.15	0.1254
a1	0.85	1	0.2	0.5	1	0.35	0.092
a7	0.85	0.4	1	0.7	0.14	0.32	-0.0102
a8	0.85	0.85	1	0.2	0.14	0.34	-0.0213
a6	0.85	0.3	0.7	1	0.17	0.32	-0.0258
a4	0.25	0.95	0.1	0.3	1	0.28	-0.1192
a2	0.5	0.5	0.2	0.2	1	0.28	-0.1636
a9	1	0.2	0.1	0.8	0.11	0.31	-0.2058

Figura 19 – Classificação completa estabelecida pelo PROMETHEE II

4.6.2

F-PROMETHEE

No método F-PROMETHEE, as avaliações das alternativas sob cada critério são números fuzzy triangulares.

A representação das incertezas foi inserida no critério GO da seguinte forma:

Critério Grau de Ocorrência (GO):

O valor das avaliações dos modos de falha sob o critério grau de ocorrência (GO) representa, conforme apresentado no item 4.3.1 deste capítulo, um índice normalizado que a partir das evidências de anormalidade utilizadas, indica a possibilidade de ocorrência da causa.

A incerteza no valor desta avaliação pode ser medida pelo valor do erro, representado como na equação (30).

Logo, a avaliação dos modos de falha sob o critério grau de ocorrência foi representada como um número fuzzy triangular $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ conforme a Figura 6.

Onde:

m = valor da avaliação do modo de falha sob o critério GO. Este índice é um valor normalizado entre 0 e 1.

$$\alpha = \begin{cases} \text{erro} & \text{se } \text{erro} \leq m \\ m & \text{se } \text{erro} > m \end{cases} \quad (32)$$

$$\beta = \begin{cases} \text{erro} & \text{se } \text{erro} \leq 1 - m \\ 1 - m & \text{se } \text{erro} > 1 - m \end{cases} \quad (33)$$

Para exemplificar, pode-se definir, para um determinado modo de falha, o valor de sua avaliação sob o critério GO igual a 0,85 e o valor de sua avaliação sob o critério CI igual a 0,75. A representação desta avaliação através de um número fuzzy $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ será:

$$m = 0,85$$

$$\text{erro} = 1 - \text{CI} = 1 - 0,75 = 0,25$$

Logo, de acordo com as equações (32) e (33)

$$\alpha = 0,25$$

$$\beta = 0,15$$

A representação gráfica deste número fuzzy $(0.85, 0.25, 0.15)_{LR}$, pode ser visualizada na Figura 20.

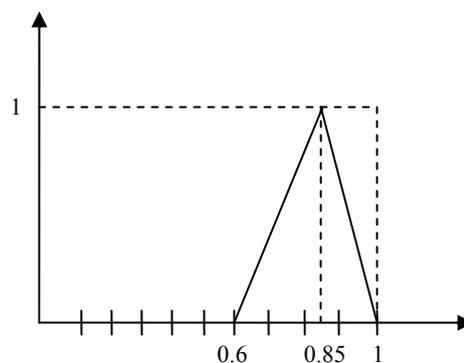


Figura 20 – Representação gráfica do número fuzzy $(0.85, 0.25, 0.15)_{LR}$

As funções de preferência utilizadas para os critérios foram as mesmas representadas pelas equações (23) e (24).

Em seguida, é então calculada a matriz de índices de preferência ponderada para cada par de alternativas, de acordo com a equação (25).

A partir destes índices são calculados os fluxos de saída, fluxos de entrada e fluxo líquido para cada alternativa, conforme as equações (26), (27) e (28) respectivamente. Estes fluxos são números fuzzy triangulares.

A ordenação das alternativas através do fluxo líquido, neste caso, deve ser feita através de um método de ordenações de números fuzzy. O método utilizado é a ordenação pelo índice de YAGER, apresentado na equação (29).

A Figura 21 apresenta a tela de ordenação estabelecida pelo F-PROMETHEE, onde são apresentados os fluxos líquidos obtidos e o índice de Yager de cada alternativa.

Alternativa	S1	S2	S3	S4	GO
a1	(0.85,0.85,0.15)	(1.00,1.00,0.00)	(0.20,0.20,0.80)	(0.50,0.50,0.50)	(1.00,0.65,0.00)
a3	(1.00,1.00,0.00)	(0.70,0.70,0.30)	(0.85,0.85,0.15)	(0.90,0.90,0.10)	(0.25,0.25,0.75)
a5	(1.00,1.00,0.00)	(1.00,1.00,0.00)	(0.90,0.90,0.10)	(0.80,0.80,0.20)	(0.17,0.17,0.68)
a10	(0.85,0.85,0.15)	(1.00,1.00,0.00)	(0.90,0.90,0.10)	(1.00,1.00,0.00)	(0.13,0.13,0.69)
a4	(0.25,0.25,0.75)	(0.95,0.95,0.05)	(0.10,0.10,0.90)	(0.30,0.30,0.70)	(1.00,0.65,0.00)
a6	(0.85,0.85,0.15)	(0.30,0.30,0.70)	(0.70,0.70,0.30)	(1.00,1.00,0.00)	(0.17,0.17,0.66)
a7	(0.85,0.85,0.15)	(0.40,0.40,0.60)	(1.00,1.00,0.00)	(0.70,0.70,0.30)	(0.14,0.14,0.68)
a8	(0.85,0.85,0.15)	(0.85,0.85,0.15)	(1.00,1.00,0.00)	(0.20,0.20,0.80)	(0.14,0.14,0.72)
a2	(0.50,0.50,0.50)	(0.50,0.50,0.50)	(0.20,0.20,0.80)	(0.20,0.20,0.80)	(1.00,0.65,0.00)
a9	(1.00,1.00,0.00)	(0.20,0.20,0.80)	(0.10,0.10,0.90)	(0.80,0.80,0.20)	(0.11,0.11,0.72)

Figura 21 – Classificação completa estabelecida pelo F-PROMETHEE

No Capítulo 5 são apresentados os estudos de casos em um equipamento real em operação em uma das empresas do setor elétrico. Estes estudos mostram que o emprego dos métodos acima acarreta diferentes “rankings” dos modos de falha.