

## 2

### Fundamentação Teórica

#### 2.1

##### Introdução

Este capítulo tem por objetivo a apresentação dos fundamentos teóricos sobre os quais este trabalho está baseado. Inicialmente, é feita uma revisão dos conceitos e aspectos principais do processo de Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM, onde são levantadas as definições para falhas, falhas funcionais, modos de falha, causas, severidade das causas e ações pró-ativas. Em seguida, são abordados os conceitos básicos relacionados à Teoria dos Conjuntos Fuzzy, Números Fuzzy e Sistemas de Inferência Fuzzy. Finalizando o capítulo é feita uma introdução aos métodos de Apoio Multicritério a Decisão, onde é apresentada a justificativa para a escolha do método PROMETHEE utilizado no trabalho.

#### 2.2

##### Manutenção Centrada em Confiabilidade – RCM

A confiabilidade dos sistemas e equipamentos, focalizando os riscos operacionais, a segurança, o meio ambiente, a otimização de recursos e o atendimento à legislação vigente, é hoje uma das principais preocupações das indústrias e empresas das mais diferentes áreas. Dentre essas, pode-se citar como especialmente interessadas as empresas do setor elétrico.

Historicamente o conceito de confiabilidade passou a gerar interesse em meados da década de 50, com o surgimento da manutenção preventiva, onde as políticas de manutenção puramente corretivas foram abolidas. Porém, foi na indústria aeronáutica americana que essa idéia veio a se consolidar quando, em 1974, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos autorizou a United Airlines a fazer um relatório sobre os processos usados pela indústria de aviação civil no preparo de seus programas de manutenção. Este relatório, escrito por NOWLAN e HEAP (1978) foi intitulado “*Reliability-Centered Maintenance*” (RCM),

traduzido para Manutenção Centrada em Confiabilidade, e ainda hoje é um dos mais importantes documentos de gestão de equipamentos fornecendo uma grande contribuição sobre as condições que devem existir para que a manutenção programada seja efetiva. Podem-se citar dois aspectos relevantes:

“- Revisões programadas têm pouco efeito na confiabilidade total de um item complexo, a não ser que o item tenha modo de falha dominante.

- Há muitos itens para os quais não há uma forma efetiva de manutenção programada.” (MOUBRAY, 2000).

A rápida disseminação do RCM motivou o desenvolvimento de versões ligeiramente diferentes da versão original do relatório de Nowlan e Heap. John Moubray e seus associados apresentaram, em 1990, uma abordagem modificada com relação à segurança ambiental. Esta versão modificada recebeu o nome de RCM2. Muitos outros autores, como SMITH (1993), CRELLIN et al (1986), BRAUER e BRAUER (1987) contribuíram para o desenvolvimento do RCM, que teve seu processo inicialmente normalizado em março de 1999, com a publicação da norma IEC 60300-3-11, “*Gestion de la sureté de fonctionnement – Partie 3-11: Guide d’application-Maintenance baseé sur la fiabilité*”. Logo em seguida, em agosto de 1999, ocorreu a publicação da norma internacional SAE JA 1011, “*Evaluation Criteria for Reliability-Centered (RCM) Processes*”, contendo os critérios mínimos que um processo deve apresentar para que seja chamado de “RCM” na visão da SAE (*Society of Automotive Engineers*). Em janeiro de 2002, estes critérios foram detalhados com a publicação da norma SAE JA 1012, “*A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*”, a qual interpreta cada item da norma SAE JA 1011.

### 2.2.1

#### Definições e Objetivos da RCM

Uma das principais funções da manutenção é a de aumentar a confiabilidade do item físico no qual é aplicada. Conforme LAFRAIA (2001), essa confiabilidade é quase inteiramente uma função da qualidade do programa ou plano de manutenção.

A Manutenção Centrada em Confiabilidade é uma evolução da manutenção tradicional. Através do enfoque da preservação das funções dos itens, esta

metodologia evita ou remove tarefas de manutenção que não são estritamente necessárias, reduzindo o custo da manutenção. Para tal objetivo, a RCM identifica, a partir de um método indutivo, os modos de falha que afetam as funções, determina a importância de cada um deles através da análise de seus efeitos e conseqüências, e seleciona as tarefas aplicáveis e efetivas na prevenção das falhas funcionais.

Segundo MOUBRAY (2000), pode-se definir Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM como sendo um “processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça no seu contexto operacional”. SMITH (1993) diz que o objetivo da RCM é “preservar as capacidades funcionais de equipamentos e sistemas em operação”. JONHSTON (2002) descreve a RCM como “um processo de análise e decisão que busca otimizar tarefas de manutenção”. A norma SAE JA 1011 estabelece que a RCM deve “determinar os requisitos de manutenção para modos de falha que possam causar falhas funcionais de quaisquer itens físicos em seu ambiente operacional”.

Como se pode observar, todas as definições acima contém características complementares que evidenciam uma mudança essencial proposta pela RCM nos objetivos da manutenção. Se antes a manutenção buscava preservar o equipamento, desativando-o, atuando em todos os seus itens e realizando tudo o que era possível ser feito, com a RCM propõe-se (SIQUEIRA, 2005):

- Maior segurança humana e proteção ambiental;
- Melhoria do desempenho operacional;
- Maior efetividade do custo da manutenção;
- Atuar conforme os modos de falha;
- Realizar apenas as atividades que precisam ser feitas;
- Aumento da vida útil dos itens físicos mais dispendiosos;
- Criação de um banco de dados completo sobre a manutenção;
- Maior motivação do pessoal envolvido com a manutenção;
- Melhoria do trabalho em equipe.

Segundo a RCM, uma estratégia efetiva de manutenção concentra-se em evitar ou reduzir as conseqüências significantes de falhas, desta forma é possível priorizar o atendimento às necessidades do processo ou aplicação, em detrimento

das necessidades próprias ou individuais dos itens (SIQUEIRA, 2005). Conseqüências significantes são aquelas que afetam um dos seguintes aspectos do ambiente operacional:

- Segurança de pessoal;
- Qualidade do meio ambiente,
- Operação do processo;
- Economia do processo.

Durante a implantação do processo RCM, sete perguntas sobre os ativos, ou itens sob análise, devem ser respondidas (MOUBRAY, 2000):

1. Quais são as **funções e padrões de desempenho** de um ativo no seu atual **contexto operacional**?
2. De que forma ele falha em cumprir suas funções, ou seja, quais são as **falhas funcionais**?
3. O que causa cada falha funcional, ou seja, quais são os **modos de falha**?
4. O que acontece quando ocorre cada falha funcional, ou seja, quais os **efeitos** da ocorrência das falhas?
5. De que forma cada falha funcional tem importância, isto é, quais as **conseqüências** que podem ser associadas às falhas?
6. O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha, ou seja, quais as **tarefas aplicáveis e efetivas**?
7. O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa preventiva apropriada, isto é, quais as alternativas restantes?

A seguir são definidos alguns conceitos fundamentais na aplicação do processo RCM, tais como: funções, padrões de desempenho, contexto operacional, falhas funcionais e potenciais, modos de falha, causas das falhas funcionais, efeitos e conseqüências das falhas. É feita também uma apresentação da técnica de análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA), a qual é utilizada na aplicação do processo RCM, e por fim são definidos os conceitos de ações pró-ativas. As definições apresentadas foram direcionadas a equipamentos de subestações de energia elétrica os quais são objetos de estudo deste trabalho.

### 2.2.2

#### Funções, Padrões de Desempenho e Contexto Operacional

As funções de cada equipamento deverão ser definidas no seu contexto operacional junto com os padrões de desempenho desejados. O contexto operacional está relacionado às condições na qual o ativo irá operar. Ele afeta as funções e os padrões de desempenho desejados, assim como os modos de falha que podem ocorrer, seus efeitos e conseqüências. Portanto, ao iniciar a implantação do processo RCM, deve-se ter uma nítida compreensão do contexto operacional. A definição das funções deve consistir naquilo que o usuário espera que o ativo faça.

Conforme MOUBRAY (2000), as funções de um equipamento podem ser divididas em funções primárias e funções secundárias. As funções primárias estão associadas principalmente à razão pela qual o ativo foi adquirido, enquanto que as funções secundárias são as outras funções que o ativo exerce, como segurança, economia, integridade estrutural, aparência e conformidade com os regulamentos ambientais. Estas são geralmente menos importantes que as funções primárias, porém devem ser muito bem analisadas, pois podem proporcionar impactos severos em determinadas situações.

SIQUEIRA (2005), por outro lado, classifica as funções em quatro categorias principais, conforme listado na Tabela 1. Em geral, as funções auxiliares e supérfluas também são consideradas secundárias.

Tabela 1 – Classificação de funções e objetivos

Fonte: SIQUEIRA (2005, p.44)

<b>Função</b>	<b>Objetivo</b>
Principal	Gera o objetivo principal do sistema
Secundária	Acrescenta objetivos ao sistema
Auxiliar	Modifica objetivos do sistema
Supérflua	Introduz objetivos desnecessários

No caso de equipamentos muito complexos, como é o caso dos transformadores, o RCM admite uma subdivisão do ativo e seus componentes em subsistemas, de forma que suas funções possam ser trabalhadas de forma mais adequada.

### 2.2.3

#### Falhas Funcionais e Potenciais

Uma falha consiste na interrupção ou alteração da capacidade de um item desempenhar uma função requerida ou esperada (SIQUEIRA, 2005). No RCM, as falhas são classificadas, de acordo com o efeito que provocam sobre uma função do sistema a que pertencem, em duas categorias: falha funcional e falha potencial. A fronteira entre desempenho satisfatório e falha é especificada pelo padrão de desempenho. Desta forma, falha funcional pode ser definida como a incapacidade de um ativo cumprir uma função para um padrão de desempenho aceitável pelo usuário. Falha potencial, por outro lado, é um desvio da condição normal, assumindo-se uma perda mensurável do desempenho, porém ainda dentro dos limites aceitáveis previamente estabelecidos.

A Figura 1 permite identificar a relação entre falha potencial e falha funcional. Pode-se identificar três períodos distintos na ocorrência de uma falha: (i) um período de tempo entre a condição normal de operação e o início da falha; (ii) um período de tempo entre o início da falha e a possibilidade de detecção da mesma; (iii) um terceiro período entre o ponto onde é possível a detecção da falha até a ocorrência da falha.

Se uma falha potencial é detectada entre os pontos P e F, na Figura 1, é possível tomar ações para prevenir ou evitar as consequências da falha funcional. MOUBRAY (2000) define o intervalo P-F como sendo o intervalo entre o ponto onde a falha torna-se detectável (falha potencial) e o ponto de ocorrência da falha funcional.

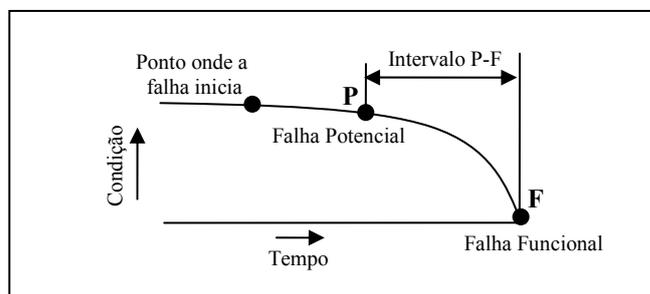


Figura 1 – Intervalo P-F  
Fonte: MOUBRAY (2000, p.145)

As falhas funcionais são ainda classificadas pelo RCM em três categorias, de acordo com a possibilidade de detecção destas falhas (SIQUEIRA, 2005):

- Falha Evidente – a qual, por si só, é detectada pela equipe de operação durante o trabalho normal;
- Falha Oculta – não pode ser detectada pela equipe de operação durante o trabalho normal;
- Falha Múltipla – uma combinação de uma falha oculta mais uma segunda falha, ou evento, que a torne evidente.

De acordo com SIQUEIRA (2005), esta classificação é adotada pelo RCM para definir melhor a estratégia de manutenção. A estratégia da manutenção deve concentrar-se em prevenir as consequências das falhas. No caso de falhas evidentes, a estratégia deverá concentrar-se em prevenir a consequência de uma falha simples; já para falhas ocultas a estratégia deverá concentrar-se em prevenir a consequência de uma falha múltipla.

#### **2.2.4**

#### **Modos de Falha**

Após a identificação das falhas funcionais, deve ser caracterizada a forma como elas ocorrem, ou seja, os modos da cada falha (SIQUEIRA, 2005). Os chamados modos de falha são eventos que trazem associados a eles uma diminuição parcial ou total da função e do desempenho do ativo. Com a identificação de cada modo de falha torna-se possível verificar suas consequências e planejar ações para corrigir ou prevenir a falha. O processo de seleção das tarefas de manutenção, e o gerenciamento subsequente destas tarefas, é realizado no RCM ao nível de modo de falha.

A manutenção pró-ativa trata os eventos (modos de falha) antes que eles ocorram; para isto é necessário que eles sejam identificados antes de ocorrerem. Desta forma, deve-se tentar identificar todos os modos de falha que provavelmente afetam o ativo. A identificação do modo de falha deve estar associado à sua possibilidade de ocorrência.

Dependendo da complexidade do ativo, do contexto operacional ou do nível em que está sendo feita a análise, poderão ser listados entre um a trinta modos de falha por falha funcional. A consideração de poucos modos de falha pode levar a

uma análise superficial, às vezes perigosa. Por outro lado, muitos modos de falha ou muitos detalhes geram uma grande complexidade, exigindo do RCM um tempo maior que o necessário (MOUBRAY, 2000). A identificação dos modos de falha é um dos mais importantes passos no desenvolvimento de qualquer programa que pretenda assegurar que qualquer ativo continue a preencher suas funções previstas.

A Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*) tornou-se o procedimento padrão para definir e documentar todos os modos de falha em um sistema. Esta técnica é detalhada na seção 2.2.7. deste capítulo.

### 2.2.5

#### Causas das Falhas Funcionais

A causa da falha funcional representa os efeitos que geram o modo de falha. A distinção entre modo de falha e causa da falha pode ser entendida da seguinte forma, conforme SIQUEIRA (2005): “O modo de falha descreve *o que* está errado na funcionalidade do item. Já a causa descreve adicionalmente *porque* está errada a funcionalidade do item”.

Uma causa pode ser exclusiva de um modo de falha, se a correção ou controle desta causa tem influência direta no modo de falha, ou pode-se ter causas associadas a diferentes modos de falha. Cada modo de falha, por sua vez, pode estar associado a um conjunto de causas.

### 2.2.6

#### Efeitos e Conseqüências das Falhas

Os efeitos da falha descrevem o que pode acontecer se o modo de falha realmente ocorrer. Esta definição evidencia a finalidade do estudo do efeito das falhas: pesquisar os impactos dos modos de falha nas funções do sistema e na instalação. Através deste estudo será possível definir as conseqüências das falhas. O efeito pesquisado deverá levar em conta o que ocorreria se nenhuma tarefa específica de manutenção fosse realizada para antecipar, prevenir ou detectar a falha (SIQUEIRA, 2005).

O efeito da falha responde à questão “o que acontece?”, enquanto a consequência responde a questão “o quanto ela importa?”.

Quando uma falha ocorre, ela sempre irá afetar a empresa de alguma forma. Em cada caso de falha, os efeitos e consequências serão diferentes. Elas podem afetar as operações, a segurança e o meio ambiente. Além disso, exigirão tempo e dinheiro para serem reparadas.

Para o RCM, as consequências das falhas são muito mais importantes que suas características técnicas, assumindo que o motivo para se fazer qualquer tipo de manutenção preventiva não é prevenir cada falha, mas sim prevenir ou pelo menos diminuir, suas consequências.

Para efeito de análise, pode-se considerar que quanto às suas consequências, as falhas funcionais podem ser graduadas entre pouco severas e severas. A severidade de uma falha funcional pode ser interpretada com um indicativo numérico das consequências associadas às falhas funcionais e deve ser atribuída por um especialista ou quantificada por algum modelo matemático, considerando consequências econômicas, operacionais, ambientais e pessoais (DUPONT, 2003).

O cálculo do grau de severidade envolve uma grande complexidade, pois engloba aspectos como a valoração das perdas devido à indisponibilidade do equipamento, o perfil de cada empresa, que poderá valorizar mais a segurança de seu pessoal e instalações, ou aceitar maiores riscos operativos para seus equipamentos em função do retorno econômico e financeiro esperado (DUPONT, 2003).

Neste trabalho foram atribuídos graus de severidade a cada modo de falha considerando cada tipo de impacto analisado de forma independente. As severidades dos impactos são utilizadas neste trabalho como critérios de avaliação para a priorização dos modos de falha.

Deste modo, a severidade foi dividida em:

- Grau de severidade atribuído ao modo de falha considerando os impactos econômicos;
- Grau de severidade atribuído ao modo de falha considerando os impactos operacionais;
- Grau de severidade atribuído ao modo de falha considerando os impactos sobre a segurança dos operadores das subestações;

- Grau de severidade atribuído ao modo de falha considerando os impactos ambientais.

Para a obtenção de uma severidade global de cada modo de falha, utilizou-se neste trabalho, um sistema de inferência fuzzy onde as entradas do sistema são as quatro severidades anteriormente citadas. Este sistema foi criado devido à dificuldade de obtenção de um modelo matemático, preciso, que considere simultaneamente todos esses graus de severidade. Este sistema é apresentado no capítulo 4.

### 2.2.7

#### **Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)**

Para a determinação dos modos, efeitos e conseqüências da falha, utiliza-se uma técnica indutiva, estruturada e lógica para identificar e/ou antecipar a(s) causa (s), efeitos e conseqüências de cada modo de falha de um item do sistema produtivo (LAFRAIA, 2001). Esta técnica é conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) - Análise de Modos de Falha e seus Efeitos.

A FMEA é uma técnica analítica que tem por finalidade assegurar que os modos de falhas potenciais possíveis de se predizerem sejam identificados, analisados, documentados e, se possível, evitados.

A FMEA de um processo ou produto:

- Identifica os modos de falha potenciais do processo ou produto;
- Avalia os efeitos potenciais da falha;
- Identifica as causas potenciais de falha e as variáveis que deverão ser controladas para a redução da ocorrência ou melhoria da eficácia de detecção da falha;
- Classifica modos potenciais, estabelecendo assim um sistema de priorização para a tomada das ações corretivas;
- Documenta os resultados do processo para futuras auditorias.

A FMEA é largamente utilizada para a análise de risco de um sistema, bem como no gerenciamento dos riscos. Os riscos em uma FMEA podem ser quantificados através do conceito do Número de Priorização dos Riscos (RPN, *Risk Priority Number*), conforme a equação (1).

$$RPN = (O) \times (D) \times (S) \quad (1)$$

Onde, através de três índices - Ocorrência (*O*), Detecção (*D*) e Severidade (*S*) - é realizada uma priorização dos modos de falha de acordo com o risco potencial.

As avaliações dos índices de severidade, ocorrência e detecção dos modos de falha sugeridas por LAFRAIA (2001), podem ser vistas nas Tabelas 2, 3 e 4 respectivamente.

Tabela 2 – Avaliação da severidade dos modos de falha  
Fonte: LAFRAIA (2001, p.112)

Severidade	Severidade do Efeito	Índice
Muito Alta	Envolve riscos à operação segura do sistema e/ou descumprimento dos requisitos legais	10 9
Alta	Provoca um alto grau de insatisfação do cliente. O sistema se torna inoperante. A falha não envolve riscos à segurança operacional ou descumprimento dos requisitos legais.	8 7
Moderada	A falha ocasiona razoável insatisfação do cliente. O cliente ficará desconfortável ou irritado com a falha. O cliente notará razoável deterioração no desempenho do sistema.	6 5 4
Baixa	A falha causará pequenos transtornos ao cliente. O cliente notará provavelmente, leves variações no desempenho do sistema.	3 2
Marginal	A falha não teria efeito real no sistema. O cliente provavelmente não notaria a falha.	1

Tabela 3 – Avaliação da ocorrência dos modos de falha  
Fonte: LAFRAIA (2001, p.113)

Frequência da Falha	Possíveis taxas de falha	Índice
Muito alta: Falha é quase inevitável	1 em 2	10
	1 em 8	9
Alta: Falhas repetidas	1 em 20	8
	1 em 40	7
Moderada: Falhas ocasionais	1 em 80	6
	1 em 400	5
	1 em 1000	4
Baixa: Relativamente poucas falhas	1 em 4000	3
	1 em 200000	2
Remota	$\leq 1$ em $10^6$	1

Tabela 4 – Avaliação da detecção dos modos de falha  
 Fonte: LAFRAIA (2001, p.113)

<b>Detecção</b>	<b>Detecção do Efeito</b>	<b>Índice</b>
Absolutamente indetectável	O modo de falha não será detectado com certeza	10
Muito baixa	O modo de falha é provavelmente muito pouco detectável	9
Baixa	Não é provável que o modo de falha seja detectável	8 7
Moderada	Há 50% de chance de se detectar o modo de falha	6 5
Alta	Há boa chance de detectar o modo de falha	4 3
Muito alta	O modo de falha será certamente detectado durante a operação do sistema	2 1

O índice de Ocorrência quantifica a probabilidade de uma causa de falha vir a ocorrer, ocasionando o modo de falha. O índice de Detecção é uma avaliação da capacidade dos controles do processo em detectar uma causa em potencial, a qual proporcionará a ocorrência de tal modo de falha. Já o índice de Severidade reflete a gravidade dos efeitos associados à ocorrência do modo de falha, refletido no meio ambiente, condições operacionais e impactos econômicos.

Ações pró-ativas devem ser recomendadas a partir da priorização dos modos de falha com maior RPN. O RPN varia entre “1” e “1000”.

A literatura apresenta algumas críticas quanto à forma de construção do RPN, tais como GILCHRIST (1993), BEN-DAYA e RAOUF (1993), CHANG et al.(2001), BOWLES e PELÁEZ(1995 e 1996), BOWLES (2003).

Algumas destas críticas são citadas a seguir:

- Diferentes pontuações para O, D e S podem ter resultados semelhantes do RPN, ainda que o risco envolvido seja completamente diferente. Segundo BOWLES (2003), dos 1000 RPN que deveriam ser produzidos pelo produto GxOxD, somente 120 são únicos.

- O RPN clássico não supre a possibilidade de considerar pesos de importância nos fatores O, D e S.

- No cálculo do RPN, um modo de falha que possui um índice de severidade muito elevado, uma baixa probabilidade de ocorrência e um elevado índice de detecção (por exemplo: S=9, O=3 e D=2 que conduz a um RPN = 54) pode ser considerado menos crítico que um outro modo de falha que possua estes índices em níveis medianos (por exemplo: S=4, O=5 e D=6, que conduz a um RPN = 120).

O trabalho apresentado nesta dissertação mostra-se eficiente para o suprimento das deficiências geradas pelo RPN, considerando um contexto multicritério, utiliza as metodologias PROMETHEE e F-PROMETHEE para a priorização dos modos de falha de equipamentos. O detalhamento desta metodologia será mostrado no capítulo 4.

### **2.2.8**

#### **Ações Pró-Ativas**

Para cada modo de falha devem ser estabelecidas ações pró-ativas adequadas, de forma a eliminar ou minimizar as conseqüências da ocorrência de tal modo de falha. As ações escolhidas devem ser tecnicamente e economicamente viáveis, ou seja, será tecnicamente viável se é fisicamente possível para a ação eliminar ou reduzir as conseqüências da ocorrência do modo de falha associado para um padrão de desempenho aceitável pelo usuário, e será economicamente viável, se os custos diretos e indiretos necessários para a sua aplicação se justificarem diante das conseqüências da falha funcional.

Conhecidas as atividades aplicáveis e efetivas para cada modo de falha deve ser feita uma priorização de forma a garantir a melhor escolha, que maximize a economia e operação do processo, respeitando as restrições de segurança e meio ambiente (SIQUEIRA, 2005).

### **2.3**

#### **Lógica Fuzzy**

A seguir serão apresentados os conceitos de lógica fuzzy utilizados na metodologia proposta neste trabalho. Na seqüência, compondo a última seção deste capítulo, são apresentados conceitos de apoio multicritério à decisão.

A lógica fuzzy pode ser definida como uma ferramenta capaz de modelar e manipular matematicamente informações imprecisas, em geral descritas em linguagem natural, fornecidas por especialistas ao caracterizar o processo estudado. A representação destas informações vagas é feita através do uso de conjuntos fuzzy.

A teoria de conjuntos fuzzy, desenvolvida por ZADEH (1965), é uma generalização da teoria dos conjuntos tradicionais para resolver os paradoxos gerados a partir da classificação “verdadeiro ou falso” da Lógica Clássica.

Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na lógica fuzzy, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa, originando o que se costuma chamar de grau de pertinência a um conjunto fuzzy.

A lógica fuzzy, juntamente com a teoria dos conjuntos fuzzy, é empregada na construção dos chamados sistemas de inferência fuzzy.

### 2.3.1

#### Teoria dos Conjuntos Fuzzy

Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é bem definido. Os elementos pertencem ou não pertencem a um dado conjunto. Como exemplo pode-se citar o conjunto dos números naturais. Entretanto, existem conjuntos cujo limite entre membro e não membro é vago, com transição gradual entre esses dois grupos, como, por exemplo, conjunto de pessoas altas e números maiores que 10.

Os conjuntos fuzzy apresentam uma caracterização mais ampla, de forma que um conjunto fuzzy  $F$  definido no universo de discurso  $U$  pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico  $x$  e seu grau de pertinência,  $\mu$ . Este valor de pertinência é obtido mediante uma função de pertinência que mapeia os elementos de  $U$  no intervalo  $[0, 1]$ , conforme descrito pela equação (2).

$$F = \{(x, \mu_F(x)) / x \in U\} \quad (2)$$

Conjuntos fuzzy podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo  $U$  for discreto, o conjunto é representado por meio da seguinte notação, descrita na equação (3):

$$F = \sum_U \mu_F(x) / x \quad (3)$$

Caso o universo  $U$  seja contínuo, a notação descrita na equação (4) é empregada:

$$F = \int_U \mu_F(x) / x \quad (4)$$

Os conjuntos fuzzy apresentam três componentes: o eixo  $x$  (números reais crescentes), que constituem o domínio do conjunto fuzzy; o eixo  $y$ , com valores entre 0 e 1, os quais representam o grau de pertinência de um elemento  $x$  ao conjunto; e a função de pertinência (superfície) do conjunto, que conecta um elemento do domínio com o seu grau de pertinência. A Figura 2 ilustra um conjunto fuzzy com suas componentes.

Onde:

$$\mu_A(x) = f(x \in A)$$

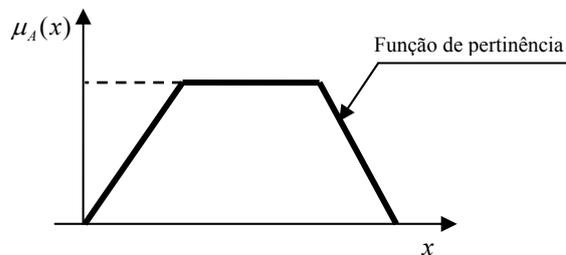


Figura 2 – Conjunto fuzzy

As propriedades dos conjuntos fuzzy são:

**Altura:** é o maior grau de pertinência permitido pela função de pertinência (“*membership function*”). Um conjunto fuzzy é dito normal se a sua altura máxima for igual a 1;

**Domínio:** é o universo total de valores possíveis para os elementos de um conjunto;

**Universo de Discurso:** é o espaço fuzzy completo de variação de uma variável do modelo;

**Suporte:** é a área efetiva do domínio de um conjunto fuzzy que apresenta  $\mu(x) > 0$  (Figura 3). O conjunto fuzzy cujo suporte é um único ponto em  $U$ , com valor  $\mu(x) = 1$ , é chamado de **Conjunto Singleton** (Figura 4).

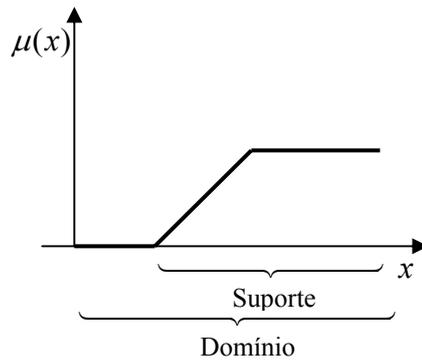


Figura 3 – Suporte do conjunto fuzzy

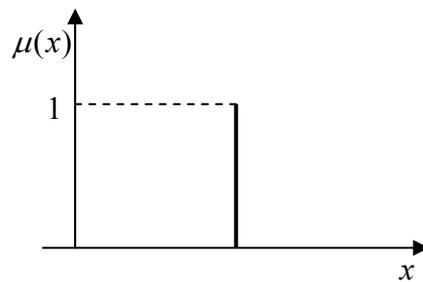


Figura 4 – Conjunto singleton

**$\alpha$ -Cut:** é uma restrição (limite) imposta ao domínio, baseada no valor de  $\alpha$ . Contém todos os elementos do domínio que possuam graus de pertinência  $\mu(x)$  acima de um certo valor de  $\alpha$ . A equação (5) mostra a definição deste conjunto.

$$A_\alpha = \{x \in U \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}, \quad \alpha \geq 0 \quad (5)$$

Onde:

A – é um conjunto fuzzy;

U – é o domínio de A.

### 2.3.2

#### Números Fuzzy

Um número fuzzy é um caso particular de conjunto fuzzy. Para que um conjunto fuzzy seja definido como número fuzzy ele deve cumprir as seguintes condições:

- Estar definido nos números reais;
- A função de pertinência deve ser contínua;
- O conjunto fuzzy deve ser normalizado;

- O conjunto fuzzy deve ser convexo.

A condição de normalização implica que existe pelo menos um valor com grau de pertinência igual a 1. A convexidade significa que os  $\alpha$ -cuts são intervalos fechados (NGUYEN, WALKER, 1997, p.45) e satisfazem a relação a seguir:

Seja o intervalo  $\alpha$ -cut  $A_\alpha$  para um número fuzzy  $A$ , definido pela equação (6):

$$A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_3^{(\alpha)}] \quad (6)$$

Logo:

$$(\alpha' < \alpha) \Rightarrow (\alpha_1^{(\alpha')} \leq \alpha_1^{(\alpha)}, \alpha_3^{(\alpha')} \geq \alpha_3^{(\alpha)}) \quad (7)$$

A condição de convexidade também pode ser escrita como:

$$(\alpha' < \alpha) \Rightarrow (A_{\alpha'} \subset A_\alpha) \quad (8)$$

Segundo DUBOIS e PRADE (1978), um número fuzzy  $M$  é denotado por  $M = (m, \alpha, \beta)_{LR}$  e é construído com uma função de pertinência  $L$  aplicada a todo  $x \leq m$  e uma função de pertinência  $R$  aplicada a todo  $x \geq m$ , conforme a equação (9) (KAUFMANN e GUPTA, 1984):

$$\mu_M(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right) & \text{para } x \leq m, \alpha > 0 \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right) & \text{para } x \geq m, \beta > 0 \end{cases} \quad (9)$$

Onde:

- $m$  é o valor principal do número fuzzy  $M$ ;
- $\alpha$  e  $\beta$  são as dispersões do lado esquerdo e direito respectivamente. Quando  $\alpha$  e  $\beta$  são iguais a zero o número fuzzy  $M$  coincidirá com o número crisp.
- $L$  e  $R$  são funções contínuas dentro do intervalo  $[0, 1]$ , as quais satisfazem as seguintes condições:

$$L(0) = R(0) = 1 \text{ e } L(1) = R(1) = 0$$

A representação gráfica do número fuzzy  $M$  é apresentada na Figura 5.

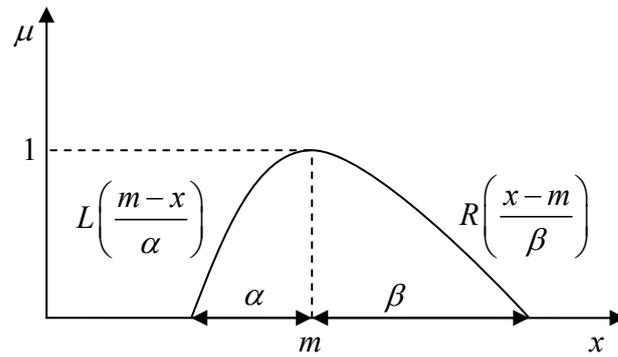


Figura 5 – Representação de um número fuzzy na forma L-R

Na forma L-R a representação de um número fuzzy pode ser trapezoidal, triangular, gaussiana, entre outras. Neste trabalho o tipo específico utilizado foi o dos números fuzzy triangulares (Figura 6), cuja função de pertinência é dada por:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 1 - \frac{m-x}{\alpha} & \text{para } (m-\alpha) < x \leq m \\ 1 - \frac{x-m}{\beta} & \text{para } m < x \leq (m+\beta) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (10)$$

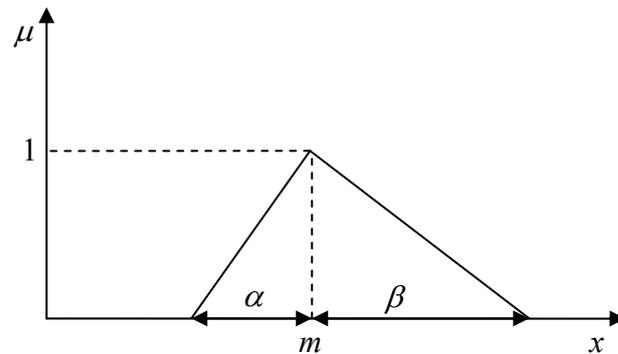


Figura 6 – Representação de um número fuzzy triangular

Se o valor principal  $m$  estiver centralizado, isto é  $\alpha = \beta$ , a função é expressa segundo a equação (11):

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{m-x}{\alpha} \right| & \text{se } (m-\alpha) < x < (m+\alpha) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (11)$$

Quando  $\alpha = \beta = 0$ , então  $M$  é um número clássico representado por  $M = (m, 0, 0)$ .

As operações básicas com números L-R fuzzy, como apresentado por DUBOIS e PRADE (1978, 1979, 1988) são as utilizadas neste trabalho e estão resumidas na Tabela 5.

Tabela 5 – Operações com números fuzzy

Operações com números fuzzy $M=(m,a,b)_{LR}$ e $N=(n,c,d)_{LR}$	
Adição	$(m, a, b)_{LR} \oplus (n, c, d)_{LR} = (m + n, a + c, b + d)_{LR}$
Elemento Oposto	$-(m, a, b)_{LR} = (-m, b, a)_{RL}$
Subtração	$(m, a, b)_{LR} - (n, c, d)_{LR} = (m - n, a + d, b + c)_{LR}$
Multiplicação por escalar	$(m, a, b)_{LR} \times (n, 0, 0) = (mn, an, bn)$
Multiplicação	
Se $M > 0$ e $N > 0$	$(m, a, b)_{LR} \otimes (n, c, d) \approx (mn, cm + an, dm + bn)_{LR}$
Se $M > 0$ e $N < 0$	$(m, a, b)_{LR} \otimes (n, c, d) \approx (mn, am - dn, bm - cn)_{LR}$
Se $M < 0$ e $N > 0$	$(m, a, b)_{LR} \otimes (n, c, d) \approx (mn, an - dm, bn - cm)_{LR}$
Se $M < 0$ e $N < 0$	$(m, a, b)_{LR} \otimes (n, c, d) \approx (mn, -bn - dm, -an - cm)_{LR}$
Inverso	$(m, a, b)_{LR}^{-1} \approx (m^{-1}, bm^{-2}, am^{-2})_{RL}$

### 2.3.3

#### Sistemas de Inferência Fuzzy

Um Sistema de Inferência Fuzzy pode ser representado como na Figura 7.

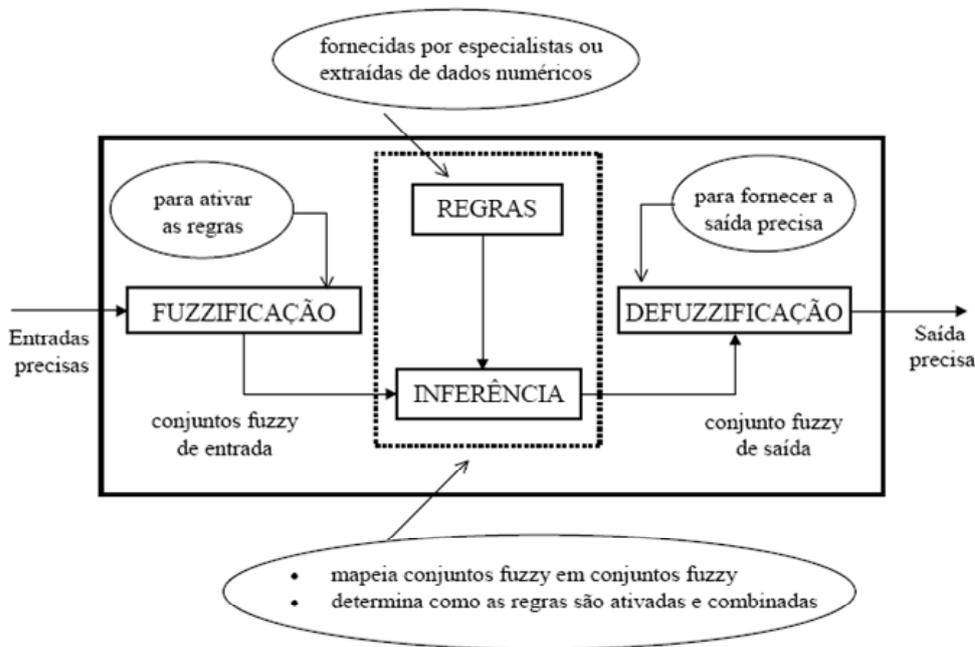


Figura 7 – Estrutura de um sistema fuzzy

Fonte: TANSCHKEIT (1998)

A fuzzificação é o mapeamento dos dados precisos de entrada para os conjuntos fuzzy (de entrada) relevantes. Nesta etapa ocorre a ativação das regras relevantes para uma dada situação. As regras podem ser fornecidas por especialistas ou extraídas de dados numéricos, e constituem um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência fuzzy. O número de regras dependerá do número de conjuntos fuzzy que compõem cada variável de entrada.

A inferência fuzzy é o processo pelo qual se obtém as saídas do sistema. É onde ocorrem as operações com conjuntos fuzzy: combinação dos antecedentes das regras, implicação e modus ponens generalizado. Um vetor de variáveis de entrada aciona as regras (proposições fuzzy) e definem a situação (forma) das variáveis de saída correspondentes. Diversos processos de inferência podem ser usados para se obter a saída do sistema de inferência fuzzy, sendo que o mais comumente usado é o método MIN-MAX. A função MIN é usada para operar o interior das regras (conectivo E) e a função MAX para compor os resultados.

A defuzzificação produz uma saída precisa para o sistema fuzzy, a partir do conjunto fuzzy de saída obtido pelo sistema de inferência. Existem vários métodos de defuzzificação, dentre eles os destacam-se o centro de gravidade e a média dos máximos. No método denominado média dos máximos, a saída precisa é obtida

tomando-se a média entre dois elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do conseqüente.

O sistema de inferência abordado neste trabalho é do tipo Mamdani (MAMDANI, 1974). Existe outro sistema de inferência conhecido como Takagi-Sugeno (TAKAGI & SUGENO, 1985) o qual difere do Mamdani na parte do conseqüente, que é uma função (geralmente linear) das variáveis do antecedente: se  $x_1$  é  $A_1$  e  $x_2$  é  $A_2$ , então  $z=f(x_1, x_2)$ . A função  $f$  é em geral um polinômio, e o sistema de inferência é geralmente referenciado em função do grau desse polinômio (TANSCHKEIT, 1998).

## 2.4

### O Apoio Multicritério à Decisão

Esta seção apresenta os aspectos relevantes ao apoio multicritério à decisão, apresentando a justificativa para a escolha do método PROMETHEE utilizado neste trabalho.

Diversos autores vêm apresentando o desenvolvimento de técnicas que auxiliem a tomada de decisão em contextos combinatórios, sob incertezas e multicritério.

Problemas complexos de tomada de decisão eram abordados, até a primeira metade do século XX, utilizando basicamente matemática para as decisões, em condições consideradas aleatórias, com grandes limitações e riscos associados. Segundo GOMES e FREITAS (2000, p.83), na década de 50 ganhou ênfase a solução de problemas empregando-se a então nascente Pesquisa Operacional. De acordo com CHIAVENATO (1999, p. 716) a Pesquisa Operacional é “a aplicação de métodos, técnicas e instrumentos científicos a problemas que envolvem as operações de um sistema, de modo a proporcionar, aos que controlam o sistema, soluções ótimas para o problema”. A partir da década de 70, a eficiência dos modelos ortodoxos de Pesquisa Operacional, em análises de problemas gerenciais complexos, começou a ser questionada. Passou-se a considerar que não mais se deveria analisar problemas procurando uma solução ótima, e sim gerar projetos e soluções de compromisso que permitissem ultrapassar a confusão que cerca as situações problemáticas no contexto empresarial. Neste contexto, surgem as Metodologias de Apoio à Multicritério à Decisão (COSTA, 1999, p.2).

O Apoio Multicritério à Decisão (AMD) consiste em um conjunto de métodos e técnicas para auxiliar ou apoiar pessoas e organizações a tomarem decisões, sob a influência de uma multiplicidade de critérios (GOMES et al, 2006).

Os métodos de apoio multicritério à decisão não têm como objetivo a apresentação de uma única e verdadeira solução para um dado problema; na verdade, eles se propõem a auxiliar o processo de decisão por meio de recomendação ao decisor de ações ou cursos de ações. Os métodos e metodologias do AMD auxiliam os decisores a compreender e a explicitar suas preferências junto às alternativas.

Segundo GOMES et al (2006), os problemas multicritério envolvem seis componentes:

1. Objetivo;
2. Decisor(es);
3. Conjunto de critérios de decisão;
4. Conjunto de alternativas;
5. Conjuntos de estados de natureza;
6. Conseqüências das decisões.

Os problemas de decisão podem ser discretos, quando se trata de um número finito de alternativas, ou contínuos, quando tal número pode ser pensado como infinitamente grande. Pode-se destacar dentre os métodos multicritério discretos a Utilidade Multiatributo, o AHP, os métodos Electre, e o método PROMETHEE. Os métodos contínuos são também denominados métodos de otimização multicritério ou métodos interativos, compreendendo basicamente métodos de programação matemática com mais de uma função objetivo.

Sendo  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$  um conjunto finito e enumerável de  $n$  alternativas ou ações potenciais,  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_k\}$  um conjunto de  $k$  critérios sob os quais as alternativas serão avaliadas e  $f_j(a_i)$  a avaliação da alternativa  $i$  sob o critério  $j$ , pode-se formular um problema multicritério a ser tratado pelos métodos AMD como:

$$\text{Max}\{f_1(a), f_2(a), f_3(a), \dots, f_k(a)\} \mid a \in A$$

Os métodos AMD procuram encontrar uma alternativa ou um conjunto restrito de alternativas que tenham seu desempenho maximizado. Entretanto, segundo ALMEIDA e SOUZA (2001), em um processo decisório, uma alternativa dificilmente maximizará seu desempenho em todos os critérios, e esta não pode ser a expectativa do decisor. Cada alternativa produzirá uma combinação própria de desempenhos, que é comparada com as combinações das demais alternativas, para só então ser tomada uma decisão. Na grande maioria dos problemas, entretanto, essas comparações são difíceis de serem feitas de forma objetiva. Normalmente, deve-se comparar valores quantitativos com qualitativos, de diferentes ordens de grandeza, ou mesmo em unidades diferentes, o que dificulta muito o processo e decisão.

Os métodos de apoio multicritério à decisão fazem um enfoque diferenciado sobre os problemas apresentando segundo GOMES, ARAYA e CARIGNANO (2004) algumas características bem definidas em relação à sua metodologia:

- A análise do processo de decisão, em que essa metodologia é aplicada, tem sempre o objetivo de identificar informações/regiões críticas;
- A existência de uma melhor compreensão acerca das dimensões do problema;
- A possibilidade de haver diferentes formulações válidas para um único problema;
- A aceitação de que, em problemas complexos, as situações nem sempre se ajustam a um perfeito formalismo e, em particular, de que estruturas que representam de forma parcial a compatibilidade entre as alternativas podem ser relevantes no processo de auxílio à decisão.

ALMEIDA e COSTA (2003), colocam que o apoio multicritério tem como princípio, no processo de decisão, buscar o estabelecimento de uma relação de preferências entre as alternativas que estão sendo avaliadas sob a influência de vários critérios.

Existem vários métodos desenvolvidos para a abordagem e tratamento de problemas com múltiplos critérios. A escolha do método depende de vários fatores destacando-se as características: do problema analisado, do contexto considerado, da estrutura de preferências do decisor e da problemática em si (ALMEIDA e COSTA, 2003).

### 2.4.1

#### Problemáticas do Apoio à Decisão

Segundo GOMES et al (2006), no contexto do apoio à decisão, o resultado a que se pretende chegar na resolução de um problema pode ser identificado de acordo com quatro tipos de problemáticas de referência, descritas a seguir:

1. **Problemática P. $\alpha$**  (Problemática de Escolha) – consiste em se encontrar, dentro de um conjunto de alternativas, um subconjunto tão restrito quanto possível, correspondente às melhores alternativas.
2. **Problemática P. $\beta$**  (Problemática de Classificação) – consiste na alocação das alternativas em categorias definidas *a priori* com base em normas aplicáveis ao conjunto de alternativas.
3. **Problemática P. $\gamma$**  (Problemática de Ordenação) – associa-se a cada alternativa uma posição dentro de um conjunto ou subconjunto de alternativas. Esta ordenação pode ser completa ou parcial, conforme as preferências.
4. **Problemática P. $\delta$**  (Problemática de Descrição) – consiste na descrição em uma linguagem apropriada das alternativas e de suas conseqüências.

Segundo GOMES et al (2006), as problemáticas definidas não são independentes. Por exemplo, a ordenação de alternativas (P. $\gamma$ ) pode servir de base para resolver um problema P. $\alpha$  ou P. $\beta$ . Muitos métodos multicritérios privilegiam a problemática P. $\gamma$ .

Neste trabalho a problemática envolvida é de ordenação (P. $\gamma$ ). O método escolhido para a busca da solução foi o PROMETHEE, muito utilizado em problemáticas deste tipo. A seguir serão abordadas algumas justificativas para a escolha deste método específico, o qual será descrito em maiores detalhes no capítulo seguinte.

### 2.4.2

#### Considerações sobre a Escolha do Método

Existem dois grupos principais de métodos encontrados na literatura, característicos de duas principais correntes no AMD: a Escola Americana e a Escola Francesa ou Escola Européia.

A Escola Americana pressupõe a condição do decisor de obter uma concepção exata sobre a utilidade dos *scores* de cada alternativa, e dos pesos de cada critério. Esta escola consiste na agregação dos diferentes critérios em uma única função de síntese.

Os principais métodos da escola americana são:

- Teoria da Utilidade Multiatributo, desenvolvido por KEENEY e RAIFFA (1976); e
- Método de Análise Hierárquica, conhecido como AHP (*Analytic Hierarchy Process*), criado por SAATY (1980).

A Escola Francesa ou Escola Européia, por outro lado, baseia-se em construir uma relação de sobreclassificação, que representa as preferências estabelecidas pelo decisor, e explorá-las a fim de ajudar a resolver seu problema.

Os principais métodos desta escola são:

- ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*), compreendendo todos os métodos da família desde o inicial ELECTRE I proposto por ROY (1968); e
- PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), e todas as suas variantes, cuja referência pioneira é o artigo de BRANS e VINCKE (1985).

Os métodos da Escola Americana se enquadram na categoria de medida de valor, enquanto aqueles da Escola Francesa na categoria de métodos de superação.

A existência das duas escolas pode ser explicada pelo fato de não existir um paradigma sobre a correta modelagem de um julgamento de valor do decisor, em vista da enorme complexidade e subjetividade associadas (GELDERMANN et al, 2000). Diferenças culturais sobre a forma de gerenciamento e estilo de decisão são também razões dadas para o surgimento das duas correntes.

No que diz respeito às bases sobre as quais os métodos se apóiam, as principais diferenças entre as escolas são as seguintes:

- Na escola americana existe o conceito de transitividade, isto é, se **a** é melhor que **b** e **b** é melhor que **c**, então **a** é melhor que **c** como premissa, enquanto na francesa não.

- A escola francesa trabalha com o conceito de incomparabilidade (considera que determinadas alternativas não podem ser comparadas), enquanto na americana há sempre possibilidade de comparação.

A escolha do método a ser empregado depende do tipo de problema em análise, do contexto estudado, dos atores envolvidos, da estrutura de preferência e do tipo de resposta que se deseja alcançar, ou seja, qual a problemática de referência (GOMES et al, 2006).

O problema em questão neste trabalho, como foi apresentado no capítulo 1, visa uma priorização de alternativas (modos de falha), sob a avaliação de diferentes critérios. Para este tipo de problemática, os métodos mais adequados são aqueles que atendem a princípios de dominância, onde estão enquadrados os métodos da escola “européia” (também conhecidos como métodos de superação) e o método AHP da escola americana.

O método AHP, proposto por Saaty, é atualmente um dos métodos mais utilizados. Este método está baseado em três princípios do pensamento analítico:

- Construção de hierarquias - no AHP o problema é decomposto em níveis hierárquicos, como forma de buscar uma melhor compreensão e avaliação do mesmo;
- Estabelecer prioridades – o ajuste das prioridades, neste método, fundamenta-se na habilidade do ser humano de perceber o relacionamento entre objetos e situações observadas, comparando pares, à luz de um determinado foco, critério ou julgamentos paritários;
- Consistência lógica – no AHP é possível avaliar o modelo de priorização construído em termos de sua consistência.

O método de Análise Hierárquica, AHP, requer o desmembramento do complexo problema de decisão por múltiplos critérios em níveis de hierarquia. O mais alto nível corresponde ao objetivo geral do processo de decisão. O segundo nível representa o critério principal que pode, posteriormente, ser desmembrado em subcritérios no próximo nível. O último nível corresponde às alternativas de decisão.

Neste método, os julgamentos comparativos entre as alternativas, para um dado critério, são feitos em uma escala de 1 a 9, na qual 1 significa que as alternativas são igualmente importantes e 9 que a alternativa “A” é estritamente

importante, ou seja, domina totalmente, com certeza, a alternativa “B”. Reciprocamente, nesse último caso “B” teria em relação à “A” avaliação de 1/9. A colocação das alternativas-origem nas ordenadas e das alternativas-destino nas abscissas permite criar uma matriz de julgamentos para dado critério. A ponderação dos critérios é dada por um vetor de prioridade dos critérios. O cruzamento do Vetor Prioridade dos Critérios com o Vetor Prioridade das Alternativas permite obter, para cada alternativa, o somatório dos produtos, peso (do critério) x valor (da alternativa), estabelecendo-se o ranking (WERNKE e BORNIA, 2001).

A principal vantagem deste método é a possibilidade de comparações relativas sem necessidade de escala absoluta para um critério, facilitando critérios qualitativos. Como desvantagens, tem-se:

- A exigência de operações matriciais e um conhecimento de Álgebra Linear;
- O somatório final para a alternativa é um número cuja alteração numa análise de sensibilidade, pode não ser adequadamente percebida;
- O AHP baseia-se num princípio de avaliação par a par de alternativas, de acordo com a construção de uma escala de valores de 1 a 9. Logo, para cada par de alternativas e a cada critério utilizado, o decisor tem de indicar sua preferência de uma alternativa em relação a todos os outros. Quando o decisor faz uma decomposição descendente a partir do genérico para o específico, o AHP força o decisor a executar um grande número de comparações e ele deve se manter coerente, estabelecendo as relações de dominância.

Segundo GOMES et al (2006), pode ser um contexto favorável para o uso dos métodos da escola francesa:

- A existência de critérios qualitativos nos quais as diferenças de desempenho intercritérios não tenham significados comparativo no que diz respeito a uma graduação de preferências;
- A natureza dos critérios é fortemente heterogênea, e acarreta avaliação das “performances” das alternativas nas mais diferentes escalas e unidades;

- A compensação de uma perda segundo um critério representado por um ganho segundo outro critério efetua-se de forma complexa e em ligação com sistemas de valores não necessariamente considerados na modelagem do problema;
- A necessidade de utilização de pseudocritérios para a obtenção das preferências globais.

Desta forma, apesar da grande utilização do método AHP nos problemas multicritérios, optou-se pelo uso dos métodos da escola francesa, os quais são baseados na relação de sobreclassificação, selecionando o método PROMETHEE para trabalhar a problemática de priorização dos modos de falhas de equipamentos elétricos. Este método apresenta uma grande vantagem que é a introdução da noção de critério generalizado, a qual tem a finalidade de captar a amplitude das diferenças entre as avaliações de cada um dos critérios, enriquecendo a estrutura de preferência. Este é um método flexível, que oferece dois graus de liberdade ao decisor: o primeiro é relativo à seleção do tipo de função de preferência ou critério generalizado; e o segundo os limiares de preferência e indiferença a definir (BRANS & MARESCHAL, 1994).

Um outro aspecto considerado é o fato de que o PROMETHEE é de fácil entendimento, de modo que os conceitos e parâmetros envolvidos em sua aplicação têm um significado físico ou econômico de rápida assimilação pelo decisor. Assim, o método propicia a modelagem de preferência de forma simples e de fácil compreensão, usando um paradigma diferente de outras abordagens que agregavam critérios por meio de uma função aditiva. Além disso, os métodos de sobreclassificação não admitem a compensação ilimitada de largas desvantagens e levam em conta o fato que pequenas diferenças entre as avaliações das alternativas nem sempre são significantes (VINCKE, 1992).

Como uma forma de comparação, pode-se citar como vantagens do método PROMETHEE em relação ao método AHP:

- Ao contrário do AHP, o PROMETHEE permite ao usuário utilizar diretamente os dados do problema em uma tabela simples multicritério;
- Ao invés de ter que realizar um grande número de comparações, o decisor apenas tem de definir suas próprias escalas de medida (sem limitações), para indicar suas prioridades e suas preferências para cada

critério (concentrando-se sobre o valor, sem se preocupar com o método de cálculo).

No Capítulo 3 será detalhado o método PROMETHEE e sua versão adaptada, o fuzzy F-PROMETHEE, os quais serão utilizados neste trabalho.