

**UMA ABORDAGEM FUZZY COM ENVELOPAMENTO DOS DADOS DA  
ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHA**

Pauli Adriano de Almada Garcia

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

---

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

---

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

---

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

---

Prof. Júlio César Silva Neves, D.Sc.

---

Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2006

GARCIA, PAULI ADRIANO DE ALMADA

Uma Abordagem Fuzzy com  
Envelopamento dos Dados da Análise dos  
Modos e Efeitos de Falha

[Rio de Janeiro] 2006

XIII, 63 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,  
Engenharia Nuclear, 2006)

Tese – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Análise dos Modos e Efeitos de Falha
2. Análise Envoltória de Dados
3. Lógica Fuzzy

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*A Deus, sobre todas as coisas.*

*Aos meus pais, meu avô e meu irmão, por acreditarem que tudo isto seria possível e me apoiarem em todos os momentos.*

*À minha esposa Vanessa, motivação para meu trabalho e minha alegria.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Paulo Fernando F. Frutuoso e Melo, por sua prestatividade, dedicação e críticas construtivas, sempre visando o melhor para a minha formação como pesquisador e, especialmente, por sua aceitação em me orientar.

Ao Prof. Roberto Schirru por sua aceitação em me orientar e, principalmente, pelos cursos oferecidos que muito contribuíram para minha formação.

Aos Profs. Antônio Carlos Marques Alvim, Celso Marcelo Franklin Lapa, Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira e ao CMD-EN Júlio César Silva Neves, por aceitarem participar da minha banca e terem dedicado parte do seu tempo na leitura de meu trabalho.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Nuclear, Tânia, Reginaldo, Josevalda (JÔ) e Ana, por toda paciência e todo apoio ao longo de todo esse tempo.

Ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) pelo apoio financeiro, fundamental, especialmente nos casos de aquisição de material didático.

A todos os amigos com os quais tive o prazer de conviver ao longo de todo este tempo, com menção especial a Maurício Sant'Ana, Laís Alencar, Vinícius Damaso, Renato Alves, João Cunha e Vivian Borges, pelo apoio, dicas, cessão de material didático, e pelo bom humor, sempre presente em todos.

Resumo da Tese apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau em Doutor em Ciências (D.Sc.)

UMA ABORDAGEM FUZZY COM DESENVOLVIMENTO DOS DADOS DA  
ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHA

Pauli Adriano de Almada Garcia

Março/2006

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo  
Roberto Schirru

Programa: Engenharia Nuclear

Nesta tese apresenta-se uma abordagem baseada em lógica fuzzy e análise envoltória de dados para priorizar os modos de falha levantados durante a realização de análise dos modos e efeitos de falhas. Com esta abordagem alcança-se uma análise comparativa entre os riscos associados a cada modo de falha e estabelece-se uma ordem de prioridade entre os mesmos de maneira a otimizar os esforços em melhoria. Tendo em vista que, numa análise como esta, estão presentes diferentes atributos de risco, e que é de suma importância que sejam extraídos os conhecimentos contidos nas opiniões de especialistas, assim como, as incertezas associadas às mesmas; faz-se necessária a utilização de uma modelagem em que se possam considerar matematicamente as variáveis lingüísticas. Para tanto, combina-se a teoria de conjuntos fuzzy com um modelo baseado em análise envoltória de dados para estabelecer uma ordem de prioridade entre os modos de falha.

Os resultados obtidos com a abordagem proposta demonstram o potencial de adotar um modelo híbrido, onde são combinadas as teorias de lógica fuzzy com análise envoltória de dados, para analisar sistemas de segurança de uma planta nuclear.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A FUZZY APPROACH WITH THE ENVELOPMENT OF THE DATA FROM THE  
FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS

Pauli Adriano de Almada Garcia

March/2006

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo  
Roberto Schirru

Department: Nuclear Engineering

In this thesis, one presents a fuzzy data envelopment approach to sort the failure modes gathered by a failure mode and effect analysis. In this approach, one obtains a comparative analysis among the risks associated to each failure mode, in order to establish a priority ranking, and optimizing improvement efforts. Considering that, in an analysis like this, different characteristics of risks must be evaluated, and it is important to elicit the knowledge contained in experts' opinions, as well as the uncertainty associated to them; it turns out necessary to adopt a modeling which considers, mathematically, linguistic variables. To do this, fuzzy sets theory will be combined with a data envelopment model to establish the ranking among failure modes.

The results obtained with the proposed approach demonstrate the potentiality of the use of a hybrid model, where the theories of fuzzy sets and data envelopment analysis are combined to analyze nuclear safety systems.

# SUMÁRIO

	Pág.
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. O Número de Priorização de Riscos e Suas Deficiências.....	3
1.3. Objetivos da Tese.....	7
1.4. Justificativa.....	8
1.5. Metodologia e Organização da Pesquisa.....	9
2. Fundamentação Teórica.....	11
2.1. Fundamentos Básicos de Lógica Fuzzy.....	11
2.2. Aplicação de Inferência Fuzzy para Tratar Modos de Falha.....	16
2.3. Análise Envoltória de Dados.....	18
2.3.1. Conceitos Introdutórios.....	18
2.3.2. Modelagem DEA.....	21
2.3.3. Aplicação de DEA em Análise de Falhas.....	23
3. Modelagem Fuzzy-DEA para Avaliar Modos de Falha.....	26
3.1. Modelo Fuzzy-DEA.....	26
3.2. Modelagem Fuzzy-DEA de Possibilidades.....	29
3.2.1. Teoria de Possibilidades.....	29
3.2.2. Modelo de Possibilidades DEA.....	31
3.3. Adaptação do Modelo de Possibilidades DEA para a Análise de Modos de Falha.....	28
4. Estudos de Caso.....	36
4.1. Definição do Sistema Auxiliar de Água de Alimentação.....	36
4.1.1. Aplicação.....	37
4.1.2. Avaliação do RPN.....	39

4.1.3. Avaliação da Inferência Fuzzy Tradicional.....	39
4.1.4. Avaliação das Técnicas Baseadas em DEA.....	41
4.1.5. Avaliação do Modelo PCCR.....	44
4.2. Aplicação do Modelo PAPGF nos Dados do Sistema de Controle Químico e Volumétrico.....	47
4.2.1. Avaliação dos Modelos PDEA.....	49
4.3. Análise dos Resultados.....	53
5. Conclusões e Recomendações.....	54
5.1. Conclusões.....	54
5.2. Recomendações.....	55
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>57</b>



## ACRÔNIMOS

A	Conjunto Alto
AFWS	Auxiliary Feed Water System
AFWT	Auxiliary Feed Water Tank
APGF	Agregação Parcial com Gravidade Fixa
APS	Análise Probabilística de Segurança
B	Conjunto Baixo
CCF	Common Cause Failure
CCP	Chance Constrained Model
CCR	Modelo DEA desenvolvido por Charnes, Cooper e Rhodes
DEA	Data Envelopment Analysis – Análise Envoltória de Dados
DMU	Decision Making Units – Unidades Tomadoras de Decisões
FCCR	Enfoque Fuzzy do Modelo CCR
FDEA	Enfoque Fuzzy dos Modelos DEA
FMEA	Failure Modes and Effect Analysis – Análise dos Modos e Efeitos de Falha
FMECA	Failure Modes, Effect and Criticality Analysis – Análise dos Modos, Efeitos e Criticidade de Falha
GRA	Grey Relational Analysis – Análise Relacional Grey
IAEA	International Atomic Energy Agency – Agência Internacional de Energia Atômica
Isoq	Isoquanta
M	Conjunto Moderado
MA	Conjunto Muito Alto
Max	Máximo
MDP	Motor Driven Pump
Min	Mínimo
PAPGF	Enfoque Possibilístico do Modelo APGF
PCCR	Enfoque Possibilístico do Modelo CCR
PDEA	Enfoque Possibilísticos dos Modelos DEA
PWR	Pressurized Water Reactor

R	Conjunto Remoto
RPN	Risk Priority Number – Número de Priorização de riscos
s.t	Subject to – Sujeito a
SG	Steam Generator
Sup	Supremo
TDP	Turbine Driven Pump

## LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

O	Índice de Ocorrência
G	Índice de Gravidade
D	Índice de Detecção
U	Universo de Entrada
V	Universo de Saída
X	Vetor linha dos elementos do universo de entrada
Y	Vetor linha dos elementos do universo de saída
x	Variável de Entrada
y	Variável de Saída
$F^j$	j-ésimo conjunto fuzzy de entrada
$G^j$	j-ésimo conjunto fuzzy de saída
$\mu_A(x)$	Grau de pertinência da variável x no conjunto A
$\sim$	Notação da característica fuzzy
$\subseteq$	Estar contido propriamente
$\wedge$	Interseção
$\vee$	União
$\mathfrak{R}$	Conjunto dos números Reais
$\Sigma$	Somatório
$\alpha$	Grau de pertinência de uma variável num conjunto fuzzy
Cr	Criticidade
$h_0$	Eficiência da DMU sob análise
v	Vetor coluna de pesos associados às variáveis de saída
u	Vetor coluna de peso associados às variáveis de entrada
$\phi$	Percentual de melhoria
$Cr_{OG}$	Percentual de Criticidade relativa considerando-se os índices O e G
$Cr_{GD}$	Percentual de Criticidade relativa considerando-se os índices G e D
$\pi$	Medida de possibilidade
$\Theta$	Conjunto não-vazio de características
$\wp(\bullet)$	Coleção de todos os subconjuntos de $\bullet$

$\theta$	Elemento de $\Theta$
$R_i$	Priorização obtida pelo método $i$

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de um sistema fuzzy	12
Figura 2.2 – Representação gráfica da função de pertinência triangular	14
Figura 2.3 – Representação gráfica da função de pertinência trapezoidal	14
Figura 2.4 – Representação gráfica da função de pertinência gaussiana	15
Figura 2.5 – Funções de pertinência para as variáveis de entrada	17
Figura 2.6 – Fronteira de eficiência técnica	19
Figura 2.7 – Fronteira de eficiência orientada para os insumos	21
Figura 2.8 – Medida de eficiência técnica de Dabreu e Farrel (DF) orientada para output	23
Figura 3.1 - Limites da função de pertinência trapezoidal	34
Figura 4.1 - Diagrama esquemático do AFWS	37
Figura 4.2 - Perfil da criticidade para ocorrência e detecção	43
Figura 4.3 - Perfil da criticidade para gravidade e detecção	44
Figura 4.4 - Esquema simplificado do CVCS	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Classificação dos índices de gravidade	3
Tabela 1.2 - Classificação dos índices relacionados à probabilidade de ocorrência	4
Tabela 1.3 - Classificação dos índices de detecção	4
Tabela 1.4 - Combinações de gravidade, ocorrência e detecção que geram RPN = 64	5
Tabela 2.1 - Conjuntos fuzzy associados às variáveis lingüísticas de entrada	16
Tabela 2.2 - Conjuntos fuzzy associados às variáveis lingüísticas de saída	17
Tabela 2.3 - Regras de inferência fuzzy	17
Tabela 4.1 - Análise dos modos e efeitos de falha (FMEA) para o AFWS	38
Tabela 4.2 - Priorização dos modos de falha por inferência fuzzy	40
Tabela 4.3 - Priorização dos modos de falha pelo modelo DEA-CCR	42
Tabela 4.4 - Priorização dos modos de falha pelo modelo APGF	43
Tabela 4.5 - Priorização dos modos de falha pelo modelo PCCR	45
Tabela 4.6 - Priorização dos modos de falha pelo modelo PAPGF	46
Tabela 4.7 - Comparação entre os diferentes métodos de priorização	46
Tabela 4.8 - Variáveis lingüísticas associadas aos modos de falha do CVCS	50
Tabela 4.9 - Classes com as mesmas características	51
Tabela 4.10 - Priorização dos modos de falha pelo modelo PCCR	52
Tabela 4.11 - Priorização dos modos de falha pelo modelo PAPGF	52

# CAPÍTULO I

*A verdadeira ignorância não é a ausência de conhecimento,  
Mas a recusa em conhecer... (Karl Popper)*

## INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados: o contexto no qual este trabalho se insere, os objetivos que se pretende alcançar, as justificativas para o desenvolvimento do estudo, a metodologia utilizada e a organização do trabalho, isto é, como se desenvolverão e serão apresentadas as etapas das pesquisas e dos casos de estudo.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O funcionamento seguro das plantas de potência nuclear, desde o desenvolvimento desta tecnologia de geração de energia, vem sendo matéria de diferentes pesquisas acadêmicas concomitante aos investimentos industriais. Com isto, diferentes projetos de pesquisas vêm se desenvolvendo e aprimorando diferentes técnicas baseadas em computação flexível (ALVARENGA *et al* 1997; PEREIRA, 1999; CHAPOT *et al*, 1999; LAPA *et al*, 2000, GARCIA *et al* 2004, GARCIA *et al* 2005, GARCIA e FRUTUOSO E MELO, 2006) para serem incorporadas nas análises envolvendo sistemas de uma planta nuclear. O desenvolvimento destas técnicas visa principalmente auxiliar na tomada de decisões em contextos combinatórios, sob incertezas e multicritério.

Numa análise probabilística de segurança (APS) tradicional, modos de falha são utilizados para descrever as falhas dos componentes. A identificação destes modos de falha, suas causas e seus efeitos torna-se então parte fundamental para o bom desenvolvimento de uma APS. Uma técnica utilizada para este fim é a análise dos modos, efeitos e criticidade de falha (FMEA/FMECA). Neste método o que se faz é analisar um sistema de forma indutiva, ou seja, partindo-se das possíveis causas até identificar os efeitos da ocorrência do respectivo modo de falha.

A utilização da FMECA para identificação de perigos e pontos críticos em sistemas nucleares é recomendada em diferentes documentos em que o foco é a análise de segurança. Dentre estes documentos pode-se citar: EPRI-TR-106706 (1996), IAEA-

Safety-series 50-P-4 (1992), IAEA-Tecdoc-1200 (2001), IAEA-Tecdoc-1267 (2002), entre outros. Em todas as referências supracitadas, o que se pretende com a aplicação da FMECA é identificar pontos críticos do sistema e recomendar ações mitigadoras para os efeitos associados aos modos de falha levantados, além de aprimorar os conhecimentos sobre o funcionamento do sistema (BLANCHARD, 1998).

Análise de risco<sup>1</sup> é uma atividade que é abundantemente realizada por engenheiros de confiabilidade e analistas de risco de qualquer indústria. Os resultados de uma APS fornecem informações para que uma decisão seja tomada com respeito a políticas de manutenção ou sobre cuidados a serem tomados num determinado ponto crítico do sistema sob análise (FULLWOOD, 2000). Uma FMECA, numa APS, tem por finalidade identificar e prover informações semiquantitativas com respeito às diferentes formas e modos de como o sistema sob análise pode vir a falhar, além de constituir os fatores de entrada para a modelagem do sistema, IAEA (1992).

Adicionalmente, a FMECA provê uma documentação histórica para futuras análises. Esta documentação é de grande valia para modificações futuras no projeto e para uma análise comparativa entre o desempenho predito e o desempenho em utilização.

Os dados levantados pela realização de uma FMECA devem ser todos considerados para uma tomada de decisão envolvendo risco. Os dados que devem influenciar o tomador de decisões estão relacionados com a probabilidade de ocorrência de um determinado modo de falha, com a gravidade dos efeitos da ocorrência deste modo de falha e com a capacidade de identificação de uma causa potencial da falha, de modo a prevenir a ocorrência do evento (BOWLES, 1998, BOWLES E BONNELL, 1998).

Uma grande dificuldade que os tomadores de decisões têm encontrado está relacionada com a análise de dados multicritério, ou seja, diferentes características devem ser levadas em consideração para que uma decisão seja tomada. No tocante à identificação e priorização de modos de falha potenciais, faz-se mister que a tomada de uma decisão errônea seja minimizada. Segundo ZWINGELSTEIN (1998), uma má priorização dos modos de falha pode conduzir a um processo de manutenção ineficiente, conseqüentemente os pontos críticos e/ou potencialmente catastróficos de um sistema

---

<sup>1</sup> Risco é uma expressão comumente utilizada para representar as incertezas referentes a uma determinada ação, estado de um componente etc, Faber and Stewart (2003).



podem não ser priorizados na política de manutenção ou nas recomendações de melhorias.

## 1.2 O NÚMERO DE PRIORIZAÇÃO DE RISCOS E SUAS DEFICIÊNCIAS

Até o presente momento, diferentes técnicas têm sido utilizadas para minimizar as interpretações errôneas ocasionadas pelo método tradicional de priorização de risco, que é o denominado Número de Priorização de Riscos (*Risk Priority Number - RPN*), BOWLES & BONNEL (1998), BOWLES (2003).

O RPN consiste do produto de três atributos associados ao modo de falha levantado durante a realização de uma FMEA. Estes atributos são representados por índices que estão relacionados com a probabilidade de ocorrência (O), a gravidade (G) dos efeitos associados à ocorrência e com o potencial de detecção (D) do modo de falha, conforme previamente mencionado. Estes índices variam numa escala numérica inteira de 1 a 10, ou, em alguns casos podendo estar numa escala, de 1 a 5, onde quanto maior o índice, pior a situação.

O índice de gravidade deve refletir a magnitude dos efeitos associados à ocorrência do modo de falha, considerando o funcionamento do sistema, da planta, a vida dos funcionários e da população circunvizinha, assim como o meio ambiente. As características deste índice podem ser vistas na Tabela 1.1, adaptada de NUNES (1999). Para auxiliar na identificação dos possíveis efeitos, uma árvore de eventos, ou um diagrama de seqüência de eventos podem ser utilizados, ao mesmo tempo em que contribuem para uma melhor identificação dos pontos críticos do sistema.

**Tabela 1.1:** Classificação dos índices de gravidade

<b>Valores Linguísticos</b>	<b>Características</b>	<b>Índices</b>
Muito alta	O efeito da falha pode afetar tanto a segurança operacional como a ambiental, podendo ocasionar danos a bens ou pessoas e/ou infringir alguma legislação ou regulamentação governamental.	9 e 10
Alta	Afeta a eficiência do sistema ao qual está associado e/ou da planta, ocasionando uma redução de potência ou até mesmo o seu desligamento.	7 e 8
Moderada	Reduz a eficiência do sistema ao qual está associado, gerando um estresse no ambiente de trabalho que leva a planta a operar num nível de risco mais elevado do que o normal.	4, 5 e 6
Baixa	O efeito da falha não interfere na operação da planta, mas reduz de forma mínima o desempenho do sistema ao qual está associado.	2 e 3
Remota	O efeito da falha praticamente não é percebido.	1

Fonte: NUNES (1999)

Já o índice relacionado à probabilidade de ocorrência, ou à frequência de ocorrência, reflete a probabilidade, ou a frequência, de uma causa de falha ocorrer e ocasionar o modo de falha em questão. Este índice também varia numa escala inteira de 1 a 10, conforme a Tabela 1.2, ou da mesma forma que o índice de gravidade, pode variar numa escala de 1 a 5. Para a obtenção destes índices, pode-se utilizar uma árvore de falha ou qualquer outra ferramenta que auxilie na determinação da probabilidade de falha ou frequência de ocorrência de um determinado modo de falha.

**Tabela 1.2:** Classificação dos índices relacionados à probabilidade de ocorrência

Valores Linguísticos	Ocorrência	Índice	Estimativa de ocorrência
Muito alta	Praticamente inevitável	10	$\geq 0,5$
		9	0,1
Alta	Frequente	8	0,05
		7	0,01
Moderada	Ocasional	6	0,02
		5	0,001
		4	0,002
Baixa	Poucas vezes	3	0,0001
		2	0,0002
Remota	Excepcionalmente.	1	<0,0002

Fonte: NUNES (1999)

O índice de detecção classifica a eficácia dos controles atuais em detectar uma causa potencial, isto é, este índice deve refletir o grau com que os testes e as tarefas de manutenção preditiva e/ou detectiva, conseguem, efetivamente, identificar um desvio ou qualquer característica que indique que uma falha está para ocorrer. As características associadas a este índice podem ser vistas na Tabela 1.3.

**Tabela 1.3:** Classificação dos índices de detecção

Valores Linguísticos	Índice	Estimativa de detecção
Muito alta	1	86% a 100%
Elevada	2	76 a 85%
	3	66 a 75%
Moderada	4	56 a 65%
	5	46 a 55%
	6	36 a 45%
Baixa	7	26 a 35%
	8	13 a 25%
Remota	9	6 a 15%
	10	0 a 5%

Fonte: LAPA e GUIMARÃES (2004a)

O problema associado ao RPN foi primeiramente levantado por BOWLES E PELÁEZ (1995 e 1996) onde ele o apresenta da seguinte forma:

*“(...) no calculo do RPN, um modo de falha que possui um índice de gravidade muito elevado, uma baixa probabilidade de ocorrência e um elevado poder de detecção ( $G = 9$ ,  $O = 3$  e  $D = 2$  que conduz a um  $RPN = 54$ ) pode ser considerado menos crítico que um outro modo de falha que possua estes mesmos índices em níveis medianos ( $G = 4$ ,  $O = 5$  e  $D = 6$ , que conduzem a um  $RPN = 120$ )”*

Contudo, em termos de ações a serem tomadas, o primeiro modo de falha, considerado por BOWLES (1998), será, de forma intuitiva, priorizado para que ações corretivas sejam tomadas no intuito de se reduzir os efeitos de danos potências associados à sua ocorrência (ou são inseridas barreiras de segurança mais efetivas, planos de emergência para mitigar os efeitos etc.).

Um segundo ponto crítico associado à priorização dos modos de falha baseada no RPN é o fato de ter-se repetidos valores de priorização, ou seja, RPN, para modos de falha com características totalmente diferentes. Segundo BOWLES (2003), dos 1000 RPN que deveriam ser produzidos pelo produto GxOxD, somente 120 deles são únicos. De acordo com a Tabela 1.4, tem-se, por exemplo, que o  $RPN = 64$  pode ser gerado de 10 maneiras distintas.

Tabela 1.4: Combinações de gravidade, ocorrência e detecção que geram  $RPN = 64$

Gravidade	Ocorrência	Detecção	RPN
1	8	8	64
2	4	8	64
2	8	4	64
4	2	8	64
4	4	4	64
4	8	2	64
8	1	8	64
8	2	4	64
8	4	2	64
8	8	1	64

Fonte: BOWLES (2003)

Um terceiro ponto crítico associado ao RPN, é que nenhum número maior do que 10 tendo um primo como fator poderá ser formado pelo produto dos três parâmetros. Assim, os números 11, 22, 33, 990 etc. são valores de RPN que não podem ser gerados pelo produto dos índices de ocorrência, gravidade e detecção. Pelo mesmo motivo, os múltiplos de 13, 17, 19 etc. serão excluídos.

Os problemas até então mencionados estão relacionados com a escala numérica associada aos índices da FMECA, onde algumas soluções foram propostas por BOWLES & BONNEL (1998) e BOWLES (2003).

Um problema um pouco mais complexo associado à priorização dos modos de falha está relacionado com as considerações de variáveis lingüísticas, provindas de especialistas que devem compor a equipe de APS designada para a execução da FMECA.

Neste caso devem ser considerados valores lingüísticos para cada um dos índices supracitados. Para que esta consideração seja feita, diferentes pesquisadores vêm lançando mão de conceitos fuzzy para incorporar na análise as orientações de especialistas. BOWLES e PELÁEZ (1995), apresentaram uma abordagem baseada em regras de inferência fuzzy. Nesta abordagem as opiniões dos especialistas são mapeadas por meio de funções de pertinência. Estas funções de pertinência são associadas a cada um dos atributos a serem considerados na análise. No capítulo 2 serão apresentadas de forma mais detalhada as fundamentações teóricas referentes aos conceitos de lógica fuzzy a serem adotados nesta tese.

PILLAY e WANG (2003), apresentaram uma abordagem híbrida onde são combinadas as técnicas baseadas em lógica fuzzy e análise relacional grey. Nesta abordagem, a lógica fuzzy é utilizada para estabelecer as funções de pertinência associadas às opiniões dos especialistas; a análise relacional grey é utilizada para estabelecer um grau de relacionamento entre os modos de falha levantados na análise e um modo de falha padrão, cujos índices atribuídos a este último representam um estado meta.

LAPA e GUIMARÃES (2004a, b), apresentaram uma aplicação em sistemas de segurança de plantas nucleares do tipo *pressurized water reactor* (PWR). Nestas aplicações, os conceitos apresentados por BOWLES e PELÁEZ (1995) são empregados para priorizar os modos de falha dos sistemas de segurança por eles tratados. Estes

mesmos sistemas serão abordados nesta tese como casos de estudo para a validação da abordagem a ser desenvolvida.

O que se pode destacar em comum em todas as abordagens supracitadas é a utilização de conjuntos fuzzy, representados por funções de pertinência, para representar a opinião de especialistas.

Para os casos em que são necessárias regras de inferência fuzzy para se alcançar os índices de risco de cada modo de falha, a seguinte observação torna-se relevante: ao se considerar, cinco conjuntos de entrada para cada parâmetro considerado na FMEA, como é feito em todos os trabalhos supracitados, ter-se-á um total de 125 arranjos diferentes possíveis. Para que haja uma boa discriminação dos modos de falha, far-se-ia mister que se tivessem 125 conjuntos diferentes no universo de saída. Este fato pode tornar a análise exaustiva, ou até mesmo inviabilizá-la por questões de tempo e de conhecimento suficientes para se estabelecer as regras de inferência.

Um outro problema que se percebe em relação a este tipo de inferência é que não se estabelece uma análise relativa entre os modos de falha. Em outras palavras, isto significa que os modos de falha podem ser analisados independentemente uns dos outros sem se considerar o conjunto dos mesmos como um todo.

Outro fator que pode suscitar dificuldades está relacionado com a combinação dos fatores de entrada para gerar um fator de saída, isto é, como devem ser combinados os conjuntos fuzzy de entrada para se ter um conjunto fuzzy de saída? Em relação a este tipo de inferência, deve-se considerar a imprecisão nas informações devido à impossibilidade de se conhecer de forma completa o funcionamento de um sistema, mesmo que os entrevistados sejam especialistas experientes.

### 1.3 OBJETIVOS DA TESE

O objetivo desta tese é apresentar algumas abordagens inéditas baseadas em computação flexível que possam auxiliar, de forma mais efetiva, do que as já existentes, o tomador de decisões, no que diz respeito à classificação de modos de falha e identificação de pontos críticos de um determinado sistema considerando-se um contexto multicritério, ou seja, onde estão presentes diferentes atributos de risco que devem ser considerados no processo decisório. Concomitante a isto, as abordagens

devem considerar variáveis lingüísticas provindas de especialistas, assim como as incertezas a elas associadas.

Para fins de modelagem, considerar-se-á um bom modelo àquele que atenda aos seguintes requisitos:

- i. Leve em consideração variáveis lingüísticas provindas da opinião de especialistas e as incertezas a elas associadas;
- ii. Não pontue da mesma forma modos de falha com características totalmente diferentes;
- iii. Considere a questão da percepção do risco, isto é, modos de falha que tenham um potencial catastrófico em relação aos demais deverão ser prioritários, a menos que a combinação dos demais índices torne o modo de falha igualmente crítico;
- iv. Estabeleça uma priorização relativa entre os modos de falha.

Para a elaboração do modelo que atenda aos requisitos mencionados, utilizar-se-á uma técnica desenvolvida na década de 70, conhecida como análise envoltória de dados (DEA), CHARNES *et al* (1978 apud CHARNES *et al.* (1996)), CHARNES *et al.* (1982), CHARNES e COOPER (1990), CHARNES *et al.* (1991), MEZA (1998) e NEVES (2000). Esta técnica é amplamente difundida em meios onde se analisa a eficiência de processos de produção, da cadeia de suprimentos etc.

O que se pretende é combinar modelos baseados em DEA com os conceitos fundamentados em lógica fuzzy, para avaliar modos de falha quando da realização de uma FMEA (GARCIA *et al* 2005a).

A aplicação de modelos baseados em análise envoltória de dados para tratar modos de falha foi introduzida por GARCIA (2001) e GARCIA *et al* (2001a e b, 2002). Porém, nestas abordagens, não são consideradas as incertezas das informações referentes aos modos de falha, levantadas durante a análise.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme previamente mencionado, não é trivial tomar qualquer decisão quando se está inserido num contexto multicritério.

Em se tratando de modos de falha, é importante que se considere a estimativa da probabilidade de ocorrência de determinado modo de falha, quais são os efeitos associados à ocorrência do mesmo, o que as especificações técnicas preconizam com respeito ao equipamento no qual o modo de falha foi identificado, quanto tempo se levaria para reparar ou substituir o equipamento e qual é a estimativa da probabilidade de se detectar o problema antes que ele ocorra, entre outros fatores.

É desejável que se tenha a menor chance de se tomar uma decisão errônea e, conseqüentemente, que não se priorize erradamente ações preditivas, preventivas e/ou correterivas. O que se pretende é desenvolver uma técnica que possa fornecer maiores subsídios para orientar de forma mais sucinta o tomador de decisões, reduzindo ao máximo a possibilidade de se tomar uma decisão que possa comprometer a segurança operacional e ambiental.

Uma outra característica associada à utilização de um modelo baseado em DEA é a de não ser necessário que se estabeleçam regras de inferência de modo a associar uma combinação de conjuntos de entrada com um determinado conjunto de saída. Este fato visa tornar o processo de avaliação dos modos de falha mais discriminatório, tendo em vista que as criticidades serão medidas em função de um conjunto selecionado para formar a isoquanta de criticidade, que será definida no capítulo 2.

## 1.5 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho de pesquisa deverá mostrar que o argumento, a seguir, é validado:

Um modelo será considerado adequado se conseguir tratar variáveis lingüísticas e suas incertezas, não considerando, contudo, modos de falha com características diferentes, ou seja, índices de ocorrência, gravidade e detecção diferentes, como sendo igualmente críticos, e considere as incertezas cognitivas dos especialistas, assim como dê a devida importância aos efeitos associados à ocorrência de determinados modos de falha.

Para validar este argumento, faz-se mister que seja realizada uma extensa revisão bibliográfica, com respeito aos principais métodos atualmente utilizados para priorizar

modos de falha que considerem isoladamente cada um dos requisitos mencionados no argumento a ser validado. Esta pesquisa bibliográfica é apresentada no capítulo 2 intitulado fundamentação teórica.

Seguindo a fundamentação teórica, pesquisas de laboratório (desenvolvimento do modelo) e de campo (conversa com especialistas) deverão ser realizadas para que as premissas mencionadas sejam verificadas e se possa validar o modelo. Esta segunda parte da pesquisa está apresentada no capítulo 3.

Depois de estabelecido o modelo, será necessário que este seja testado. Para tanto, casos de estudo serão realizados de modo a analisar os resultados e compará-los com as principais técnicas já existentes. Estes casos de estudo estão apresentados no capítulo 4.

Por fim, conclusões referentes aos trabalhos desenvolvidos e recomendações para futuros trabalhos foram feitas e estão apresentadas no capítulo 5.



## CAPÍTULO II

*Todo o nosso saber começa nos sentimentos...*  
(Leonardo da Vinci)

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo apresenta-se a fundamentação teórica básica referente às técnicas baseadas em sistemas de inferência fuzzy e análise envoltória de dados que são utilizadas para tratar modos de falha.

#### 2.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LÓGICA FUZZY

Conforme mencionado no Capítulo I, diferentes pesquisadores vêm buscando alternativas para incorporar numa modelagem matemática a experiência de especialistas em análises de falhas. Tem-se buscado diferentes abordagens fuzzy para tratar este problema em diferentes áreas, sendo que, na área nuclear LAPA e GUIMARÃES (2004a, b) propuseram um enfoque baseado em inferências do tipo SE ... ENTÃO. Este enfoque é baseado nos conceitos de lógica fuzzy pura, onde se mapeiam, por meio de inferências, os conjuntos do universo de discurso de entrada  $U \subset \mathfrak{R}$  para o universo de discurso de saída  $V \subset \mathfrak{R}$ . Estas regras fuzzy são da seguinte forma:

$$\mathfrak{R}^{(i)} : \text{SE } x_1 \text{ é } F_1^i \text{ e } \dots x_n \text{ é } F_n^i \text{ ENTÃO } y \text{ é } G^i \quad (2.1)$$

onde  $F_i^j$  e  $G^j$  são conjuntos fuzzy,  $x = (x_1, \dots, x_n)^T \rightarrow U$  e  $y \rightarrow V$  são as variáveis dos universos de entrada e saída, respectivamente, e  $j = 1, 2, \dots, M$  são os diferentes conjuntos de entrada e de saída.

É importante ressaltar que em problemas de engenharia, entre outros, os universos de discursos de entrada e saída a serem considerados estão contidos no conjunto dos números reais. Tendo em vista este fato, faz-se mister mapear estes universos nítidos (*crisps*), contidos nos números reais, no universo nebuloso (*fuzzy*). O método mais comum de fazer este mapeamento é a utilização de um fuzzificador para mapear o universo de entrada nos conjuntos fuzzy, e de um defuzzificador para mapear os

conjuntos fuzzy de saída nos números reais. Em outras palavras, é preciso associar um determinado dado real a um número (conjunto) fuzzy pré-estabelecido, e associar, por outro lado, um número (conjunto) fuzzy de saída com um dado real que represente de forma *crisp* o conjunto de saída. Esta relação entrada x saída pode ser visualizada na Figura 2.1.

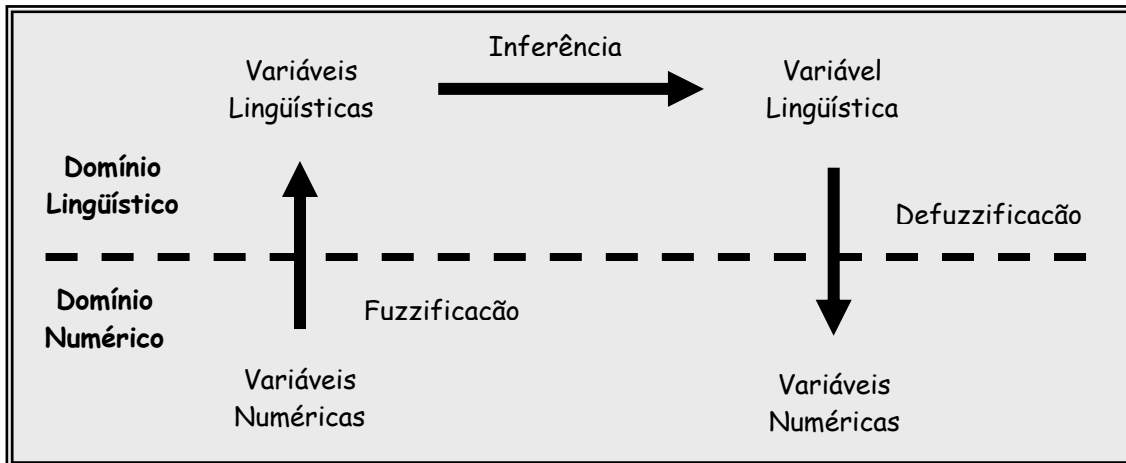


Figura 2.1: Representação de um sistema fuzzy

A diferença básica entre a lógica fuzzy e a lógica formal é a noção de conjunto. Se de uma grande quantidade de dinheiro se tira um centavo, ainda se terá uma grande quantidade de dinheiro. Tirando-se outro centavo, e mais outro, ainda se estará diante de uma grande quantidade de dinheiro. Finalmente, restará apenas um centavo. Ainda é uma grande quantidade de dinheiro? Caso contrário, em que ponto se deixa de ter uma grande quantidade de dinheiro?

A noção clássica, baseada em lógica formal, resolveria este dilema inserindo um limite arbitrário para definir o conceito ou conjunto grande quantidade de dinheiro, caracterizado como:

$x$  = quantidade de dinheiro

$A$  = conjunto “grande quantidade de dinheiro”

$A = \{x \in \mathbb{R} \mid x \geq \text{R\$ } 100.000.000,00\}$

Ou ainda, tem-se a função característica que associa um valor para todo  $x \in \mathbb{R}$ , tal que:

$$\begin{aligned}\mu_A(x) &= 1 \text{ se } x \in A \\ \mu_A(x) &= 0 \text{ caso contrário}\end{aligned}$$

Por esta definição, se o conjunto contiver R\$99.000.000,00 ele não será considerado uma grande quantidade de dinheiro.

Com a noção de conjunto fuzzy, cada centavo retirado da quantidade de dinheiro diminui o grau de pertinência do conjunto em relação ao conjunto grande quantidade de dinheiro. Assim, a transição de pertinência para não pertinência é feita de modo gradual. A função de pertinência é aquela que define os grau de pertinência dos elementos, sendo uma generalização da função característica da teoria *crisp*, uma vez que associa a todo elemento do universo de discurso um valor no intervalo  $[0,1]$  ao invés do conjunto constituído por apenas dois elementos  $\{0, 1\}$ .

Esta função de pertinência pode assumir várias formas de representação e, dentre as mais comuns, tem-se: a triangular, a trapezoidal e a gaussiana. A forma de representação caracterizada pela função de pertinência triangular é definida como:

$\tilde{A} = (x, \mu_{\tilde{A}}(x) \mid x \in \mathfrak{R})$  e  $\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0,1]$ , onde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \text{ se } x < a; \\ \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{x - a}{b - a}, \text{ se } x \in [a, b]; \\ \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{c - x}{c - b}, \text{ se } x \in [b, c]; \\ \mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \text{ se } x > c \end{array} \right. \quad (2.2)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os limites inferior, central e superior, respectivamente.

A representação gráfica de uma função triangular pode ser vista na Figura 2.2, onde estão representados os limites supracitados.

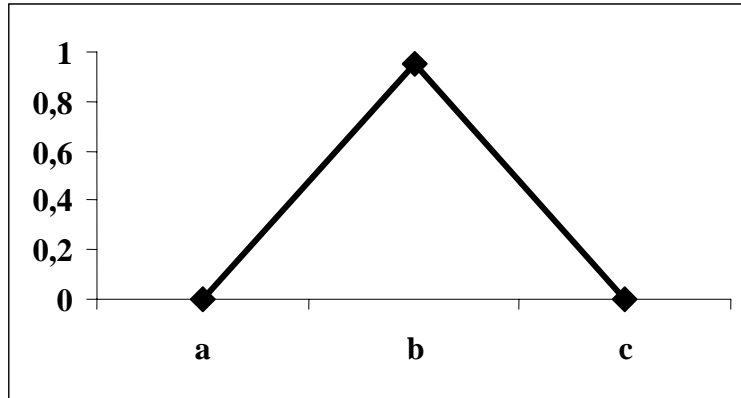


Figura 2.2: Representação gráfica da função de pertinência triangular

A função trapezoidal é definida como  $\tilde{A} = (x, \mu_{\tilde{A}}(x) | x \in \mathfrak{R})$  e  $\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0,1]$ ,

onde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \text{ se } x < a; \\ \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{x - a}{b - a}, \text{ se } x \in [a, b]; \\ \mu_{\tilde{A}}(x) = 1, \text{ se } x \in [b, c]; \\ \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{d - x}{d - c}, \text{ se } x \in [c, d] \\ \mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \text{ se } x > d \end{array} \right. \quad (2.3)$$

onde a é o limite inferior da função de pertinência, os pontos no intervalo [b,c] fazem parte dos elementos que certamente pertencem ao conjunto caracterizado pela função, e d é o limite superior desta função.

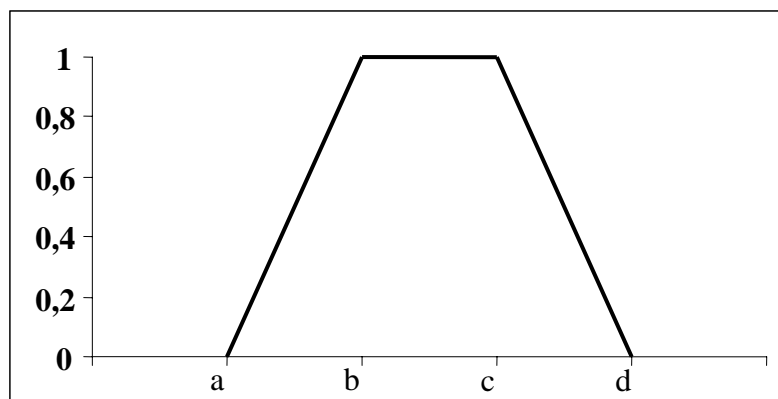


Figura 2.3: Representação gráfica da função de pertinência trapezoidal

A função de pertinência gaussiana é definida por:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = e^{-k(x-m)^2}, \text{ para } k > 0 \quad (2.4)$$

A representação gráfica para a função gaussiana pode ser vista na figura 2.4.

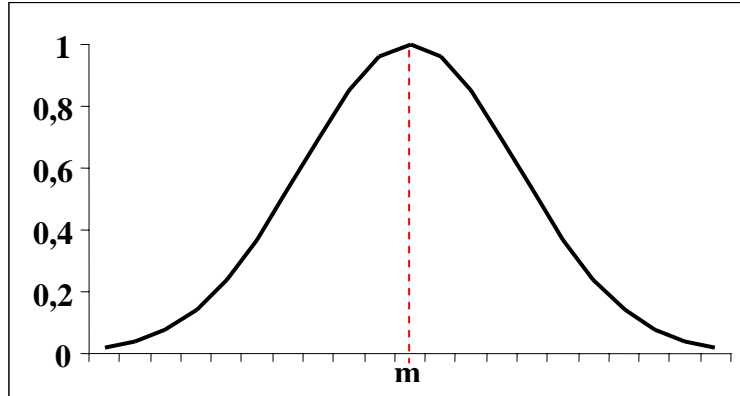


Figura 2.4. Representação gráfica da função de pertinência gaussiana

As variáveis utilizadas na lógica fuzzy são chamadas de lingüísticas por não possuírem valores precisos, podendo ser definidas, como na linguagem, representando uma gama de valores.

Considerando-se os conceitos supracitados sobre lógica fuzzy, as operações básicas de conjuntos *crisp* para conjuntos fuzzy podem ser compreendidas conforme proposto por ZADEH (1978):

- Igualdade:  $\tilde{A} = \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x), \forall x \in X$
- Inclusão:  $\tilde{A} \subseteq \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x), \forall x \in X$
- Complemento:  $\overline{\tilde{A}} \Leftrightarrow \mu_{\overline{\tilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x), \forall x \in X$
- Interseção:  $\tilde{A} \wedge \tilde{B} = \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x), \forall x \in X$
- União:  $\tilde{A} \vee \tilde{B} = \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) = \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x), \forall x \in X$

## 2.2 APLICAÇÃO DE INFERÊNCIA FUZZY PARA TRATAR MODOS DE FALHA

A partir do conceito de números (conjuntos) fuzzy, apresentado na seção anterior, será estabelecido o domínio de cada um dos conjuntos fuzzy do universo de entrada para as variáveis lingüísticas a serem consideradas na FMECA. O domínio de cada número será estabelecido pelos especialistas que deverão compor a equipe que realizará a análise.

Para se chegar a um conjunto final, será considerado o tempo de experiência na área. A partir desta informação, será estabelecido um conjunto de pesos que serão atribuídos às opiniões de cada especialista, de modo a chegar-se a um domínio final para cada variável de entrada e saída a ser considerada (PILLAY e WANG, 2003).

Como exemplo, tem-se um caso simplificado em que os conjuntos fuzzy, apresentados na Tabela 2.1, para os valores lingüísticos Remoto, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto, são estabelecidos considerando-se a opinião de 5 especialistas. Nesta tabela, a, b e c são os limites inferior, central e superior dos números triangulares associados a cada valor;  $\beta$  é o peso normalizado associado à experiência dos especialistas que compõem a equipe da FMECA e, finalmente,  $\alpha$  é o grau de pertinência da variável real  $x$  no conjunto fuzzy característico.

Após a obtenção das opiniões dos especialistas, os valores finais dos limites dos números triangulares são obtidos pela ponderação das opiniões pelos respectivos valores de  $\beta$  associado a cada uma delas.

Este exemplo será apresentado no Capítulo 4 como caso de estudo desta tese.

Tabela 2. 1: Conjuntos fuzzy associados às variáveis lingüísticas de entrada

Especialista	$\beta$	a ( $\alpha=0$ )					b ( $\alpha=1$ )					c ( $\alpha=0$ )				
		R	B	M	A	MA	R	B	M	A	MA	R	B	M	A	MA
1	0,3	0	2	4	7	9	1,5	3,5	6	8,5	10	3	5	8	10	10
2	0,2	0	1,5	3,5	6	8,5	1,7	3,2	5,5	8,0	10	2,8	4,8	7,8	10	10
3	0,2	0	1,8	3,7	6,8	8,7	1,6	3,7	5,7	8,8	10	2,5	5,3	8,4	10	10
4	0,2	0	1,9	3,8	7,2	9,4	1,4	3,6	5,8	8,7	10	3,2	5,3	8,2	10	10
5	0,1	0	1,7	3,6	6,9	8,8	1,5	3,5	5,8	8,1	10	2,9	5,0	8,2	10	10
Total	1	0	1,8	4,1	6,8	8,9	1,5	3,5	5,8	8,4	10	2,9	5,0	8,1	10	10

Fonte: LAPA e GUIMARÃES (2004a, b)

A representação gráfica destes conjuntos é apresentada na figura 2.5.

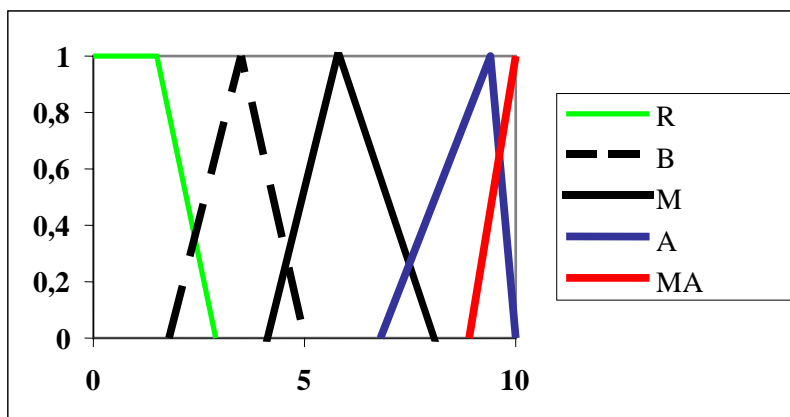


Figura 2.5: Funções de pertinência para as variáveis de entrada

As variáveis relacionadas ao risco podem ser vistas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Conjuntos fuzzy associados à variável lingüística de saída

Especialista	$\beta$	A					B					c				
		R	B	M	A	MA	R	B	M	A	MA	R	B	M	A	MA
1	0,3	0	0,7	2,3	2,9	6,2	0,1	1,5	2,6	5,3	6,9	1,3	2,7	3,6	7,8	10
2	0,2	0	0,2	1,7	3,7	5,8	0,5	2	3,3	5,8	7,8	1	3	4,9	7	10
3	0,2	0	1,2	3,7	5,2	7,2	1,3	3,2	5,7	6,9	8,4	2,9	4,9	8,4	8,8	10
4	0,2	0	1,2	3,7	5,2	7,2	1,8	3,5	4,1	7,5	9,1	3,1	4,9	7,1	9,1	10
5	0,1	0	0,7	3,5	4,8	7,4	0,5	1,1	3,8	5,3	7,5	3,1	4,5	6,9	8,8	10
Total	1	0	1,1	2,9	4,3	6,8	0,8	2,5	3,7	6,1	7,8	1,9	3,8	5,8	7,3	10

Fonte: LAPA e GUIMARÃES (2004a, b)

As regras de inferência para um determinado sistema podem ser estabelecidas conforme apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Regras de inferência fuzzy

1 – Se O é B e G é M e D é R Então Risco é B
2 – Se O é B e G é A e D é B Então Risco é M
3 – Se O é M e G é B e D é B Então Risco é A
4 – Se O é B e G é MA e D é B Então Risco é MA
5 – Se O é M e G é M e D é B Então Risco é A
6 – Se O é B e G é R e D é A Então Risco é B

Fonte: LAPA e GUIMARÃES (2004a)

Estabelecido o conjunto de saída adequado para a combinação de fatores de entrada, aplica-se um procedimento de defuzzificação para obter-se uma solução no domínio dos números reais. Como procedimento de defuzzificação será considerado o

método do centro de massa, ou centróide, que segundo SHAW e SIMÕES (1999) é o mais adequado em processos de tomada de decisão. Este procedimento obedece à seguinte fórmula:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(x_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(x_i)} \quad (2.5)$$

onde os  $\mu_{o,k}(x_i)$  indicam os pontos de máximo das funções de pertinência de saída, e  $x_i$  é um número do universo de discurso.

Para eliminar a necessidade de se fazer as inferências para o risco e posteriormente utilizar um processo de defuzzificação, o que se pretende é utilizar um modelo baseado em análise envoltória de dados, a qual é apresentada na seção que se segue.

## 2.3 ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

### 2.3.1 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

Um processo de produção pode ser avaliado considerando-se duas características de eficiência: técnica e econômica. A eficiência técnica é a proficiência com que os insumos utilizados no processo de produção são convertidos em produtos. Na figura 2.6, T1 e T2 são duas técnicas distintas utilizadas pelas unidades U1, U2 e U3. U1 e U2 são unidades ditas tecnicamente eficientes, enquanto U3 é tecnicamente ineficiente.



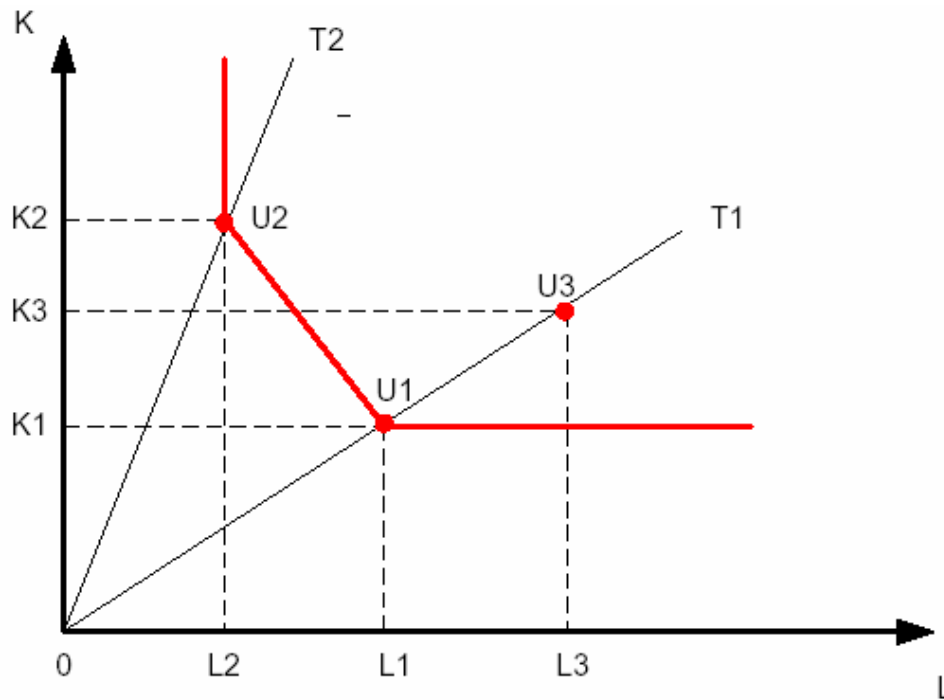


Figura 2.6: Fronteira de Eficiência Técnica

Já a eficiência econômica refere-se à otimização de custos e lucros associados à técnica que transforma insumos em produto. O processo produtivo é dito eficiente se não existir outro alternativo, ou uma combinação de processos, que produza a mesma quantidade a um custo menor.

A eficiência técnica diz respeito ao aspecto físico da produção, enquanto que a econômica é uma extensão da técnica, ou seja, envolve aspectos físicos e monetários. Com base neste paradigma, o processo para ser economicamente eficiente requer a máxima eficiência técnica (DE SOUZA, 2003).

A eficiência técnica é orientada para o produto ou para o insumo, isto é:

- ✓ Qual é o máximo de produtos que se pode produzir tendo-se fixado uma dada quantidade de insumos? (pergunta feita quando se olha para os produtos);
- ✓ Qual é o mínimo de insumo que se pode utilizar para gerar uma dada quantidade de produtos? (pergunta feita quando se olha para os insumos)

O ótimo, para ambos os casos, pode ser estimado em relação a uma situação ideal, por exemplo, estima-se a função de produção, e calcula-se a renda líquida máxima, que é a base de comparação. Ou ainda, estima-se a função custo e deriva-se o custo mínimo, em relação ao qual o custo observado é avaliado.

Esse ótimo pode ser calculado para cada grupo de produtores e, com isto, um produtor é comparado com os que produzem tanto quanto ou mais do que ele, com quantidade de insumos igual ou menor. Com este procedimento, alcança-se a eficiência relativa.

A avaliação por meio de fronteiras é a base das estimativas de eficiência. Este tipo de estudo teve início com Farrell em 1957, que propôs um modelo empírico para a medida de eficiência relativa, em oposição ao modelo de função de produção. Segundo FARREL (1957), é melhor determinar a medida da eficiência da firma em relação ao melhor nível de eficiência observado do que em relação a algum ideal inatingível. Neste caso, a fronteira de eficiência é construída pelos valores observados de insumos e de produtos, e não por valores estimados.

Farrell propôs um método econométrico para estimar a função de produção e para medir a eficiência técnica (ET), que é um método não paramétrico de fronteira determinista.

Considere-se uma firma produzindo  $y$  com os insumos  $x_1$  e  $x_2$ , e ainda que a fronteira de produção é dada por  $y = f(x_1, x_2)$ . Sob retorno constante de escala, pode-se escrever  $1 = f(x_1, x_2)$ . Expressando  $x_2$  em função de  $x_1$ , obtém-se a isoquanta unitária, que é a fronteira técnica.

Na Figura 2.7,  $Isoq_x$  é a isoquanta unitária da firma eficiente, ou seja, é a melhor combinação de insumos que podem produzir no máximo  $y$ . Na prática essa isoquanta é desconhecida, sendo necessário estimar a função de produção da firma eficiente. Se outra firma usa a quantidade de insumos, definida pelo ponto P, para produzir a mesma quantidade de produto, sua eficiência técnica é representada pela distância QP. Esta quantidade QP indica quanto os insumos podem ser, proporcionalmente, reduzidos sem diminuir a produção. A razão QP/OP mede a ineficiência técnica. A eficiência técnica (ET) é dada por:

$$ET = 1 - \frac{QP}{OP} \quad (2.6)$$

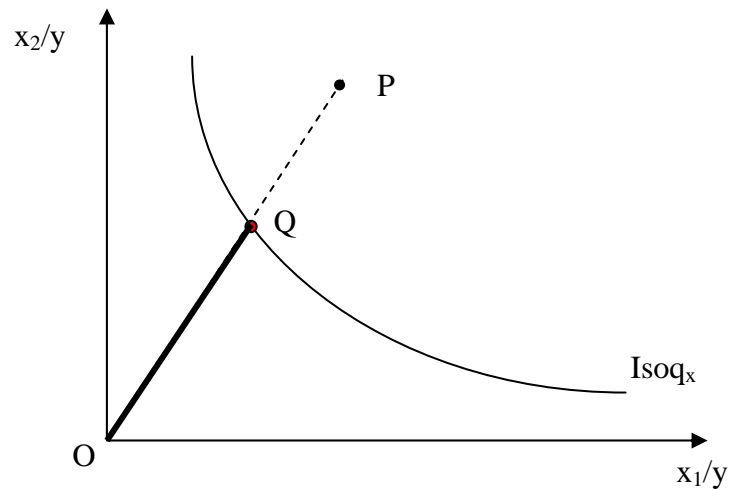


Figura 2.7: Fronteira de eficiência orientada para os insumos

Neste caso, se  $ET = 1$  significa que a firma é tecnicamente eficiente, pois está sobre a isoquanta eficiente, como é o caso do ponto Q.

Foi a partir destes conceitos que se desenvolveram os modelos de análise envoltória de dados.

### 2.3.2 MODELAGEM DEA

Os modelos econométricos paramétricos, tanto estocásticos quanto deterministas, impõem formas funcionais para representar as tecnologias. A abordagem baseada em envoltória de dados (DEA) não necessita desta pressuposição. A eficiência das unidades de tomadas de decisões (DMU – “*Decision Making Units*”) são medidas em relação à fronteira, que é gerada pelos vetores  $(x,y)$ , onde  $x$  é o vetor de insumos (doravante denominados inputs) e  $y$  é o vetor de produtos (doravante denominados outputs). É importante ressaltar que no presente caso a fronteira é gerada e não estimada.

Com base nos conceitos de Farrel (1957), Charnes, Cooper e Rhodes, em 1978, deram início à abordagem não paramétrica para considerar múltiplos inputs e outputs. O modelo por eles proposto expande a abordagem apresentada por Farrel, onde um único

input é utilizado para gerar um único output, considerando-se uma combinação de inputs para gerar diferentes outputs. Estes diferentes inputs e outputs são ponderados de modo a obter-se um input e um output virtual (CHARNES *et al*, 1996).

$$\text{Eficiência Técnica} = \frac{\text{Soma ponderada dos produtos}}{\text{Soma ponderada dos insumos}} \quad (2.7)$$

Nesta análise, um conjunto de pesos deve ser definido de modo a maximizar a eficiência da unidade sob análise, doravante denominada Unidade Tomadora de Decisões (DMU).

Uma análise baseada em DEA é um método de ponto extremo, onde se avalia cada DMU com a melhor das DMU, sendo portanto denominado um método de medida de eficiência relativa.

A principal suposição adotada em uma abordagem como a supracitada é que, se uma DMU  $i$  é capaz de produzir  $Y$  unidades de produto com  $X$  insumos, então outras DMU deveriam estar também aptas para fazer o mesmo se elas estivessem operando com eficiência.

Uma análise via DEA é baseada em programação matemática para a aferição do desempenho de DMU quando da presença de múltiplos fatores de entrada e saída, para os quais “não se pode”, a priori, atribuir pesos.

A modelagem matemática proposta por Charnes, Cooper e Rhodes (1978 *apud* CHARNES *et al*, 1996) é apresentada nas equações 2.8 – 2.11.

$$\text{Max } h_0 = v' y_0 \quad (2,8)$$

t.q.

$$u' x_0 = 1 \quad (2,9)$$

$$v' Y - u' X \leq 0, k = 1, \dots, n \quad (2,10)$$

$$u, v \geq 0 \quad (2,11)$$



### 2.3.3 APLICAÇÃO DE DEA EM ANÁLISE DE FALHAS

A utilização de um modelo baseado em DEA para analisar dados providos por uma FMEA foi pioneiramente apresentada por GARCIA *et al* (2001a e b). Para tanto, algumas considerações e adaptações foram feitas:

- As DMU são os modos de falha levantados pela FMEA;
- Os outputs são os níveis dos índices de ocorrência, gravidade e detecção estabelecidos pela equipe;
- Como input é adotado um valor igual e constante para todos os modos de falha,

O fato de assumir um valor igual e constante para todos os modos de falha dá-se por considerar o contexto operacional como sendo o input, ou seja, a configuração do processo propriamente dito e dos sistemas de controle são fatores preponderantes para a atribuição dos índices de ocorrência, gravidade e detecção. Como os componentes estão sujeitos ao mesmo contexto operacional, isto é, integram um mesmo sistema, é bastante razoável que esta consideração seja feita (GARCIA, 2001). Em outras palavras, o que se está buscando é a isoquanta de criticidade, ou seja, dado o contexto operacional quais são os modos de falha que são mais “ineficientes” (críticos).

Uma constatação feita no estudo de GARCIA *et al* (2001a e b) é o fraco poder discriminatório do modelo CCR tradicional. Esta deficiência já é bastante conhecida junto aos usuários de modelos DEA e, para sanar esta deficiência, diferentes estudos foram e vêm sendo desenvolvidos.

Para que o enfoque baseado em DEA na priorização dos modos de falha, obtenha um bom poder discriminatório, o modelo DEA APGF foi desenvolvido (GARCIA, 2001). Neste modelo destacam-se as seguintes características:

- i. Modos de falha com elevado índice de gravidade são considerados prioritários na priorização;
- ii. Modos de falha com uma combinação de elevados índices de ocorrência e detecção podem ser, relativamente, considerados tão críticos quanto um outro que possua somente o índice de gravidade elevado;

Em outras palavras, este modelo procura atender ao que preconiza as diferentes normas e padrões para aplicação da FMEA para identificar e priorizar perigos (QS9000, 1989; Milstd-1629A, 1984 e IAEA, 1999).

Para alcançar estes objetivos faz-se uma análise de criticidade parcial, onde primeiramente consideram-se os índices de ocorrência e gravidade e, posteriormente, os índices de gravidade e detecção. Para cada criticidade parcial calcula-se, por meio do modelo CCR adaptado tradicional, a criticidade do modo de falha considerando-se somente os índices dois a dois, mantendo-se sempre fixo o índice de gravidade.

A criticidade final do modo de falha é obtida por meio da média aritmética das duas criticidades parciais, conforme equação (2.12).

$$Cr = \frac{1}{2}(Cr_{OG} + Cr_{GD}) \quad (2.12)$$

$Cr_{OG}$  é a criticidade obtida pelo modelo DEA CCR convencional, conforme previamente mencionado, considerando-se como output os índices de ocorrência e gravidade, e  $Cr_{GD}$  é a criticidade obtida pelo modelo DEA CCR tradicional, também conforme previamente mencionado, considerando-se como output os índices de gravidade e detecção. A criticidade final consiste da média aritmética das criticidades parciais.

Na presente tese o que se pretende é combinar os conceitos apresentados na seção sobre lógica fuzzy com os apresentados nesta seção para que se obtenha um modelo de envelopamento de dados fuzzy para avaliar os modos de falha levantados pela FMEA. Neste caso, as incertezas associadas às variáveis devem ser levadas em consideração na priorização dos modos de falha, pois estas incertezas representam o desconhecimento (grau de ignorância) com respeito ao sistema.

## CAPÍTULO III

*Originalidade é a arte de ocultar as fontes...*  
(Benjamin Franklin)

### MODELAGEM FUZZY-DEA PARA AVALIAR MODOS DE FALHA

Neste capítulo, os conceitos de lógica fuzzy e análise envoltória de dados são combinados de modo a se estabelecer um modelo fuzzy DEA capaz de estabelecer uma ordem de prioridade entre os modos de falha considerando-se as variáveis lingüísticas provenientes de especialistas.

#### 3.1 MODELO FUZZY-DEA

A teoria de conjuntos fuzzy vem sendo utilizada como técnica para quantificar dados imprecisos ou vagos nos modelos DEA. Os modelos fuzzy-DEA são baseados nos modelos de programação linear fuzzy (KAO e LIU, 2000, KAHRAMAN E TOLGA, 1998, MAEDA *et al.* (1998)). O modelo CCR com coeficientes fuzzy (FCCR) apresenta-se da seguinte forma:

FCCR

$$\begin{aligned} & \text{Max } v^T \tilde{y}_0 \\ & \text{t.q.} \\ & u^T \tilde{x}_0 = 1 \\ & v^T \tilde{Y} - u^T \tilde{X} \leq 0 \\ & u, v \geq 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde:

$\tilde{x}_0$  é o vetor coluna das variáveis fuzzy input da DMU<sub>0</sub>

$\tilde{X}$  : é a matriz das variáveis fuzzy input das demais DMU

$\tilde{y}_0$  : é o vetor coluna das variáveis fuzzy output da DMU<sub>0</sub>

$\tilde{Y}$  : é a matriz das variáveis fuzzy output das demais DMU



De forma similar ao modelo CCR tradicional, as restrições  $u^T \tilde{x}_0 = 1$  e  $v^T \tilde{Y} - u^T \tilde{X} \leq 0$  no modelo FCCR são utilizadas para normalizar o valor de  $v^T \tilde{y}_0$ . Entretanto, a função objetivo pode exceder 1, visto que a primeira e a segunda restrição no modelo (3.1) são satisfeitas de modo possibilístico. Isto é, visto que os parâmetros utilizados no modelo são conjuntos (números) fuzzy, as restrições são aproximadamente iguais ou menores, ou iguais a um e zero, respectivamente. Este fato implica na possibilidade de se ter uma eficiência maior ou igual a um.

Tendo em vista que se está considerando coeficientes fuzzy, o modelo CCR não pode mais ser resolvido utilizando-se um “*solver*” padrão, para resolução de problemas de programação linear tradicionais. Com variáveis fuzzy de entrada e saída, as condições de otimalidade para o modelo CCR *crisp* precisam ser esclarecidas e generalizadas. O modelo CCR fuzzy correspondente é geralmente resolvido utilizando-se algum método de ordenação para conjuntos fuzzy. Algumas das principais publicações referentes à resolução de modelos fuzzy DEA podem ser classificadas em quatro categorias distintas: 1) as que enfocam o conceito de tolerância, 2) as que se baseiam em defuzzificação, 3) as que se fundamentam em graus de pertinência e 4) as que se fundamentam em ordenação de números fuzzy.

O enfoque baseado em tolerância pode ser encontrado em SENGUPTA (1992) e KAHRAMAN e TOLGA (1998). A idéia principal deste tipo de abordagem está relacionada com a incorporação das incertezas nos modelos DEA definindo-se níveis de tolerância para a violação das restrições.

Os enfoques baseados em defuzzificação podem ser vistos em LERTWORASIRIKUL (2001), onde os valores dos inputs e outputs são primeiramente defuzzificados, e transformados em números *crisp*, antes de serem incorporados no modelo DEA. Com este procedimento, os modelos fuzzy DEA podem ser resolvidos de forma tradicional por meio de um *solver* convencional.

Os enfoques baseados em grau de pertinência podem ser vistos em MAEDA *et al* (1998), KAO e LIU (2000) e LERTWORASIRIKUL (2001). Neste caso, os modelos fuzzy DEA são resolvidos por meio de programação matemática tradicional, considerando-se cortes nos graus de pertinência  $\alpha$ . Resolvendo o problema para um dado grau de pertinência, tem-se um intervalo de eficiência para a DMU sob análise.

Com uma determinada quantidade destes intervalos, pode-se construir um conjunto de eficiência fuzzy para a respectiva DMU.

O enfoque baseado em ordenação de conjuntos fuzzy foi desenvolvido por GUO e TANAKA (2001). Neste caso, tanto as desigualdades quanto as igualdades das restrições do modelo fuzzy CCR são definidas por métodos de ordenação, de modo que o modelo resultante é um modelo de programação linear de dois níveis. Para o caso de serem considerados conjuntos triangulares simétricos para os coeficientes, esta modelagem provê um conjunto de eficiência fuzzy triangular assimétrica. Com esta modelagem, alcança-se um conjunto não dominado, ou seja, que se encontra sobre a fronteira de eficiência, para um dado nível  $\alpha$  de pertinência. Neste caso, a DMU é dita  $\alpha$ -possibilística não dominada se o seu valor máximo para a eficiência fuzzy para o nível  $\alpha$  de pertinência for maior ou igual a 1.

Segundo LERTWORASIRIKUL *et al* (2003), para cada um dos enfoques supracitados tem-se prós e contras no que se refere ao trato das incertezas associadas aos dados. Por exemplo, o enfoque baseado em tolerância: fuzzificam-se as igualdades e desigualdades, mas não tratam os coeficientes fuzzy diretamente.

O enfoque baseado em defuzzificação é bastante simples, mas as incertezas associadas aos inputs e outputs não são consideradas de forma conjunta, isto é, consideram-se somente as incertezas independentes.

O enfoque baseado em níveis de possibilidades provê uma eficiência fuzzy para uma dada DMU sob avaliação, mas requer que se tenha uma ordenação dos conjuntos fuzzy, associados às eficiências, obtidos.

O enfoque baseado em ordenação de conjuntos fuzzy provê uma eficiência fuzzy para a DMU sob avaliação para um nível de pertinência  $\alpha$  pré-estabelecido. Nesta abordagem, GUO e TANAKA (2001), comparam-se as eficiências fuzzy utilizando-se um único número fuzzy para um dado grau de pertinência  $\alpha$ . Este enfoque ignora o intervalo de variação associado a este grau de pertinência. Além do mais, esta abordagem necessita que se resolvam problemas de programação linear bi-nível.

Para a presente tese, o que se pretende é utilizar um modelo baseado em teoria de possibilidades para solucionar o problema de programação linear com coeficientes fuzzy, apresentado por LERTWORASIRIKUL *et al* (2003). A fundamentação teórica referente ao desenvolvimento deste modelo é apresentada na seção que se segue.

## 3.2 MODELAGEM FUZZY-DEA DE POSSIBILIDADES

Para a modelagem via teoria de possibilidades o que se faz é considerar os eventos fuzzy por meio de medidas de possibilidades. Para tanto alguns conceitos referentes à teoria de possibilidades serão introduzidos.

### 3.2.1 TEORIA DE POSSIBILIDADES

Seja  $(\Theta_i, \wp(\Theta_i), \pi_i)$ , para cada  $i = 1, 2, \dots, n$ , um espaço de possibilidades com  $\Theta_i$  sendo um conjunto não-vazio de interesse;  $\wp(\Theta_i)$  a coleção de todos os subconjuntos de  $\Theta_i$ ; e  $\pi_i \in [0, 1]$  uma medida de possibilidade para cada elemento de  $\wp(\Theta_i)$ .

Dado um espaço de possibilidades conforme o supracitado e com:

- i.  $\pi(\emptyset) = 0, \pi(\Theta_i) = 1$ ; e
- ii.  $\pi(\cup_i A_i) = \sup\{\pi(A_i)\}$  com cada  $A_i \in \wp(\Theta_i)$ .

ZADEH (1978) definiu uma variável fuzzy,  $\tilde{\xi}$ , como uma função real definida em  $\Theta_i$  com função de pertinência:

$$\mu_{\tilde{\xi}}(s) = \pi(\{\theta_i \in \Theta_i \mid \tilde{\xi}(\theta_i) = s\}) = \sup_{\theta_i \in \Theta_i} \{\pi(\{\theta_i\}) \mid \tilde{\xi}(\theta_i) = s\}, \forall s \in \mathfrak{R} \quad (3.2)$$

Considerando-se um produto (interseção) no espaço de possibilidades supracitado tal que  $\Theta = \Theta_1 \times \Theta_2 \times \Theta_3 \dots \times \Theta_n$ , e da teoria de possibilidades, tem-se

$$\pi(A) = \min_{i=1, 2, \dots, n} \{\pi_i(A_i) \mid A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n, A_i \in \wp(\Theta_i)\} \quad (3.3)$$

Sejam  $\tilde{a}$  e  $\tilde{b}$  duas variáveis fuzzy dos espaços de possibilidades  $(\Theta_1, \wp(\Theta_1), \pi_1)$  e  $(\Theta_2, \wp(\Theta_2), \pi_2)$ , respectivamente. Com isto,  $\tilde{a} \leq \tilde{b}$  é um evento fuzzy definido no espaço de possibilidades do produto  $(\Theta = \Theta_1 \times \Theta_2, \wp(\Theta), \pi)$ , com:

$$\pi(\tilde{a} \leq \tilde{b}) = \sup_{\substack{\theta_1 \in \Theta_1 \\ \theta_2 \in \Theta_2}} \left\{ \pi((\theta_1, \theta_2) \mid \tilde{a}(\theta_1) \leq \tilde{b}(\theta_2)) \right\} = \sup_{\substack{\theta_1 \in \Theta_1 \\ \theta_2 \in \Theta_2}} \left\{ \min\{\pi(\theta_1), \pi(\theta_2)\} \mid \tilde{a}(\theta_1) \leq \tilde{b}(\theta_2) \right\} \quad (3.4)$$

Combinando a equação (3.4) com a definição de variável fuzzy (3.2) tem-se:

$$\pi(\tilde{a} \leq \tilde{b}) = \sup_{s, t \in \mathfrak{R}} \left\{ \min(\mu_{\tilde{a}}(s), \mu_{\tilde{b}}(t)) \mid s \leq t \right\} \quad (3.5)$$

De modo similar, as possibilidades dos eventos fuzzy do tipo  $\tilde{a} < \tilde{b}$  e  $\tilde{a} = \tilde{b}$  definidos no espaço de possibilidades  $(\Theta, \wp(\Theta), \pi)$  são:

$$\pi(\tilde{a} < \tilde{b}) = \sup_{s, t \in \mathfrak{R}} \left\{ \min(\mu_{\tilde{a}}(s), \mu_{\tilde{b}}(t)) \mid s < t \right\} \quad (3.6)$$

$$\pi(\tilde{a} = \tilde{b}) = \sup_{s, t \in \mathfrak{R}} \left\{ \min(\mu_{\tilde{a}}(s), \mu_{\tilde{b}}(t)) \mid s = t \right\} \quad (3.7)$$

respectivamente.

Para o caso em que  $\tilde{b}$  seja um número *crisp*  $b$ , então as possibilidades dos correspondentes eventos fuzzy são dadas por:

$$\pi(\tilde{a} \leq b) = \sup_{s \in \mathfrak{R}} \left\{ \min(\mu_{\tilde{a}}(s)) \mid s \leq b \right\} \quad (3.8)$$

$$\pi(\tilde{a} < b) = \sup_{s \in \mathfrak{R}} \left\{ \min(\mu_{\tilde{a}}(s)) \mid s < b \right\} \quad (3.9)$$

$$\pi(\tilde{a} = b) = \mu_{\tilde{a}}(b) \quad (3.10)$$

Sejam  $\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n$  variáveis fuzzy, e seja  $f_j: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  uma função real, para  $j = 1, \dots, m$ . A possibilidade de um evento fuzzy  $f_j(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) \leq b$ ,  $j = 1, \dots, m$ , é dada por:

$$\pi(f_j(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) \leq b, j=1, \dots, m) = \sup_{s_1, s_2, \dots, s_n} \left\{ \min_{1 \leq i \leq n} (\mu_{\tilde{a}_i}(s_i)) \mid f_j(s_1, \dots, s_n) \leq b, j=1, \dots, m \right\} \quad (3.11)$$

Com base nestes conceitos de teoria de possibilidades, os modelos fuzzy-DEA (FDEA) são transformados em modelos de possibilidades DEA (PDEA).

### 3.2.2 MODELO DE POSSIBILIDADES DEA

O conceito de programação restringida por chances (CCP – “*Chance-Constrained Programming*”), introduzido por CHARNES e COOPER (1959 *apud* LERTWORASIRIKUL (2003)) é utilizado como método para solucionar os modelos fuzzy CCR. A resolução via CCP trata as incertezas especificando-se o nível de confiança com o qual podem-se tratar as restrições. Utilizando-se o conceito de CCP e de possibilidade dos eventos fuzzy, o modelo FCCR torna-se o seguinte modelo de possibilidades CCR (PCCR):

$$\begin{aligned} & \text{Max} \quad \tilde{f} \\ & \text{t.q:} \\ & \pi(\underline{v}^T \tilde{y}_0 \geq \tilde{f}) \geq \beta \\ & \pi(\underline{u}^T \tilde{x}_0 = 1) \geq \alpha_0 \\ & \pi(\underline{v}^T \tilde{y}_0 - \underline{u}^T \tilde{x}_0 \leq \underline{0}) \geq \underline{\alpha} \\ & \underline{u}, \underline{v} \geq \underline{0} \end{aligned} \quad (3.12)$$

onde  $\beta$  e  $\alpha_0 \in [0,1]$  são os níveis de possibilidade aceitáveis, pré-estabelecidos, para as restrições 1 e 2, respectivamente, do modelo (3.12). Enquanto que  $\underline{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T \in [0,1]^n$  é um vetor coluna de níveis de possibilidades aceitáveis para o vetor de possibilidades das restrições 3, e  $\pi(\tilde{f} \leq \underline{v}^T \tilde{y}_0) = \sup_{s, t \in \mathfrak{R}} \left\{ \min(\mu_{\tilde{f}}(s), \mu_{\underline{v}^T \tilde{y}_0}(t)) \mid s \leq t \right\}$ , conforme definido por ZADEH (1978).

A interpretação do modelo PCCR é que o valor do objetivo  $\tilde{f}$  deve ser o máximo valor para o qual a função de retorno,  $\underline{v}^T \tilde{y}_0$ , pode alcançar para um nível de possibilidade  $\beta$ , sujeito aos níveis de possibilidades das restrições 2 e 3. Em outras palavras, a solução ótima é obtida quando se alcançam valores para  $\underline{v}^T \tilde{y}_0$  pelo menos iguais ao valor de  $\tilde{f}$  com nível de possibilidade  $\beta$ , enquanto que, ao mesmo tempo, todas as restrições são satisfeitas para um nível de possibilidade pré-estabelecido.

**Definição 1.** Uma DMU é dita  $\alpha$ -possibilística eficiente se  $\tilde{f}$  for maior ou igual do que 1 para este dado nível de possibilidade  $\alpha$ .

**Definição 2.** Dada uma variável fuzzy  $\tilde{a}$  num espaço de possibilidades  $(\Theta, \wp(\Theta), \pi)$ , a variável fuzzy  $\tilde{a}$  é normal se  $\sup_{s \in \mathfrak{R}} \mu_{\tilde{a}}(s) = 1$ .

**Definição 3.** Um conjunto de nível  $\alpha$  de uma variável fuzzy  $\tilde{a}$  é definido por um conjunto de elementos que pertencem à variável  $\tilde{a}$  com grau de pertinência de pelo menos  $\alpha$ , isto é,  $a_\alpha = \{s \in \mathfrak{R} \mid \mu_{\tilde{a}}(s) \geq \alpha\}$ .

**Definição 4.** Uma variável fuzzy  $\tilde{a}$  é convexa se:

$$\mu_{\tilde{a}}(\lambda s_1 + (1-\lambda)s_2) \geq \min(\mu_{\tilde{a}}(s_1), \mu_{\tilde{a}}(s_2)) \quad \forall s_1, s_2 \in \mathfrak{R}, \lambda \in [0,1].$$

De forma alternativa, uma variável fuzzy  $\tilde{a}$  é convexa se ela for convexa para todos os níveis  $\alpha$  de pertinência.

**Lema 1.** Sejam  $\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n$  variáveis fuzzy com funções de pertinência normais e convexas. Seja, também,  $(\bullet)_{\alpha_i}^L$  e  $(\bullet)_{\alpha_i}^U$  os limites inferior e superior do conjunto de possibilidade  $\alpha$  de  $\tilde{a}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Diante disto, para quaisquer níveis de possibilidades  $\alpha_1, \alpha_2$  e  $\alpha_3$ , com  $0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \leq 1$ , as seguintes afirmações são verdadeiras:

- i.  $\pi\left(\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i \leq \mathbf{b}\right) \geq \alpha_1$  se, e somente se,  $\sum_{i=1}^n (\tilde{a}_i)_{\alpha_1}^L \leq \mathbf{b}$ ;
- ii.  $\pi\left(\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i \geq \mathbf{b}\right) \geq \alpha_2$  se, e somente se,  $\sum_{i=1}^n (\tilde{a}_i)_{\alpha_2}^U \geq \mathbf{b}$ ;
- iii.  $\pi\left(\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i = \mathbf{b}\right) \geq \alpha_3$  se, e somente se,  $\sum_{i=1}^n (\tilde{a}_i)_{\alpha_3}^L \leq \mathbf{b}$  e  $\sum_{i=1}^n (\tilde{a}_i)_{\alpha_3}^U \geq \mathbf{b}$ .

As demonstrações destas proposições encontram-se em LERTWORASIRIKUL *et al* (2003).

Dado que os conjuntos fuzzy de entrada e saída para o modelo PCCR são normais e convexos, segue do lema 1 que o modelo PCCR pode ser resolvido considerando-o como sendo da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
& \text{Max} \quad \tilde{f} \\
& \text{t.q:} \\
& (\underline{\mathbf{v}}^T \underline{\tilde{\mathbf{y}}}_0)_{\beta}^U \geq \tilde{f} \\
& (\underline{\mathbf{u}}^T \underline{\tilde{\mathbf{x}}}_0)_{\alpha_0}^U \geq 1 \\
& (\underline{\mathbf{u}}^T \underline{\tilde{\mathbf{x}}}_0)_{\alpha_0}^L \leq 1 \\
& (\underline{\mathbf{v}}^T \underline{\tilde{\mathbf{y}}} - \underline{\mathbf{u}}^T \underline{\tilde{\mathbf{x}}})_{\alpha}^L \leq \underline{0} \\
& \underline{\mathbf{u}}, \underline{\mathbf{v}} \geq \underline{0}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Dependendo da forma da função de pertinência, o modelo supracitado pode ser linear ou não.

Para casos em que as funções de pertinência sejam trapezoidais, conforme figura 3.1, o modelo pode ser formulado da seguinte forma:

$$\underset{u,v,f}{Max} \bar{f}$$

t.q

$$\begin{aligned} (1-\beta)(v^t \tilde{y}_0)_0^U + \beta(v^t \tilde{y}_0)_1^U &\geq \bar{f} \\ (1-\alpha_0)(u^t \tilde{x}_0)_0^U + \alpha_0(u^t \tilde{x}_0)_1^U &\geq 1 \\ (1-\alpha_0)(u^t \tilde{x}_0)_0^L + \alpha_0(u^t \tilde{x}_0)_1^L &\leq 1 \\ (\underline{1}-\underline{\alpha})((-u^t \tilde{X})_0^L + (v^t \tilde{Y})_0^L) + \underline{\alpha}((-u^t \tilde{X})_1^L + (v^t \tilde{Y})_1^L) &\leq \underline{0} \\ u, v &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

É importante notar que as funções triangulares são casos particulares das trapezoidais, onde os limites inferiores e superiores, para  $\alpha = 1$ , são iguais.

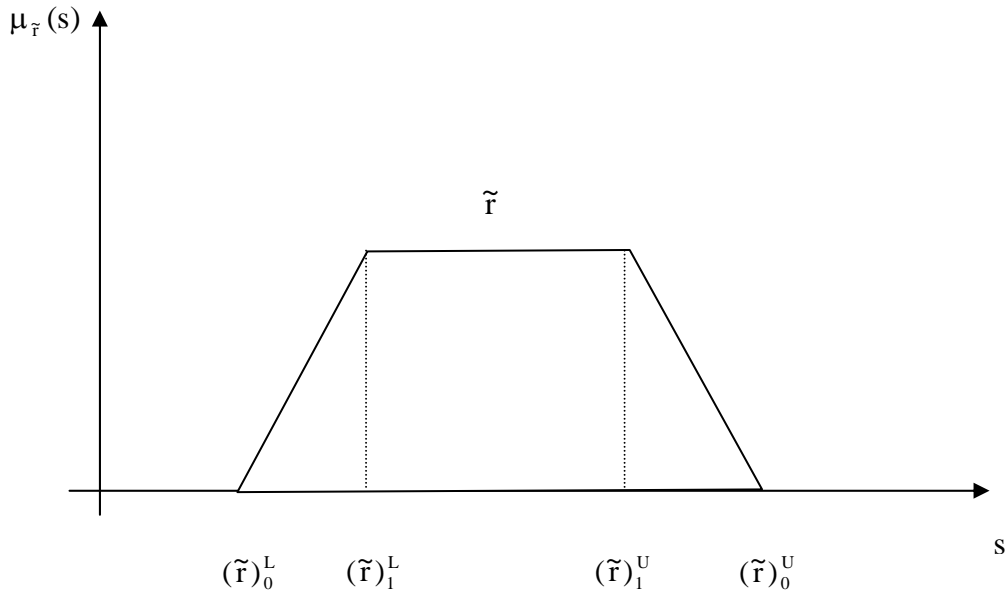


Figura 3.1: Limites da função de pertinência trapezoidal

### 3.3 ADAPTAÇÃO DO MODELO DE POSSIBILIDADES DEA PARA A ANÁLISE DE MODOS DE FALHA

Conforme mencionado em capítulos anteriores, o que se pretende é utilizar a essência da modelagem apresentada na seção anterior para priorizar modos de falhas levantados na FMEA. Para esta priorização, considerar-se-ão os índices de ocorrência, gravidade e detecção de modo a estabelecer-se um grau de criticidade relativa entre os modos de falha.



Tomado por base as considerações feitas em GARCIA *et al* (2001a e b) e também, por questões de facilidade nos cálculos, o fato de se trabalhar com números fuzzy triangulares, faz com que o modelo 3.14 possa ser escrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & \underset{v,f}{Max} \quad \bar{f} \\
 & t.q \\
 & (1-\alpha)(\underline{v}^t \underline{\tilde{y}}_0)^U + \alpha(\underline{v}^t \underline{\tilde{y}}_1)^U \geq \bar{f} \\
 & (1-\alpha)((-1)_0^L + (\underline{v}^t \underline{\tilde{Y}}_0)^L) + \alpha((-1)_1^L + (\underline{v}^t \underline{\tilde{Y}}_1)^L) \leq 0 \\
 & v \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Observe-se que nesta modelagem as restrições 2 e 3 do modelo 3.14 desaparecem, tendo em vista que se está assumindo um valor igual e constante para todos os modos de falha.

Outras duas considerações serão assumidas nos estudos de caso que serão desenvolvidos para validar a metodologia (GARCIA *et al*, 2005):

- $\alpha = \beta$  para todos os casos;
- A criticidade final do modo de falha será calculada a partir da média aritmética das fuzzy eficiências encontradas, considerando-se níveis de possibilidades iguais a 0, 0,1, 0,2, ...1.

No capítulo que se segue apresentar-se-ão dois casos, em que são analisados os modos de falha de um sistema auxiliar de água de alimentação, e de um sistema de controle químico e volumétrico, ambos de uma típica planta PWR.

## CAPÍTULO IV

*A curiosidade de conhecer as coisas foi dada aos homens como castigo divino... (Montaigne)*

### ESTUDOS DE CASO

No presente capítulo são apresentados dois casos em que a modelagem apresentada no capítulo III é aplicada, e comparam-se os resultados obtidos com as técnicas de priorização baseada no RPN tradicional, na lógica fuzzy pura, nos modelos PDEA e PDEA APGF (GARCIA et al, 2005). Os casos a serem estudados referem-se a uma simplificação do sistema auxiliar de água de alimentação (AFWS) e de controle químico e volumétrico, ambos de uma usina nuclear PWR típica de dois circuitos. A este último caso só será aplicado o modelo de Possibilidades na Agregação Parcial das Eficiências (PAPGF). Os dados para a realização destes estudos foram obtidos em LAPA e GUIMARÃES (2004a, b).

#### 4.1. DEFINIÇÃO DO SISTEMA AUXILIAR DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema auxiliar de água de alimentação (AFWS) é composto de dois subsistemas: um deles é composto por uma turbo bomba (TDP), que tem a capacidade de fornecer cem por cento das necessidades dos geradores de vapor (SG); o outro, é composto por duas bombas motorizadas (MDP), onde cada uma atende a cinquenta por cento das necessidades dos SG. Em outras palavras, o funcionamento da turbo bomba é suficiente para o bom funcionamento do AFWS ou o funcionamento das duas MDP.

Numa usina nuclear típica, o sistema auxiliar de água de alimentação deve desempenhar as seguintes funções básicas:

- i. Suprir os geradores de vapor em caso de perda do sistema de água de alimentação principal;

- ii. Manter o nível de água nos geradores de vapor de modo a remover o calor residual gerado pelo reator enquanto este se encontra a uma potência inferior a dez por cento da potência nominal.

Uma representação esquemática do sistema é apresentada na Figura 2.

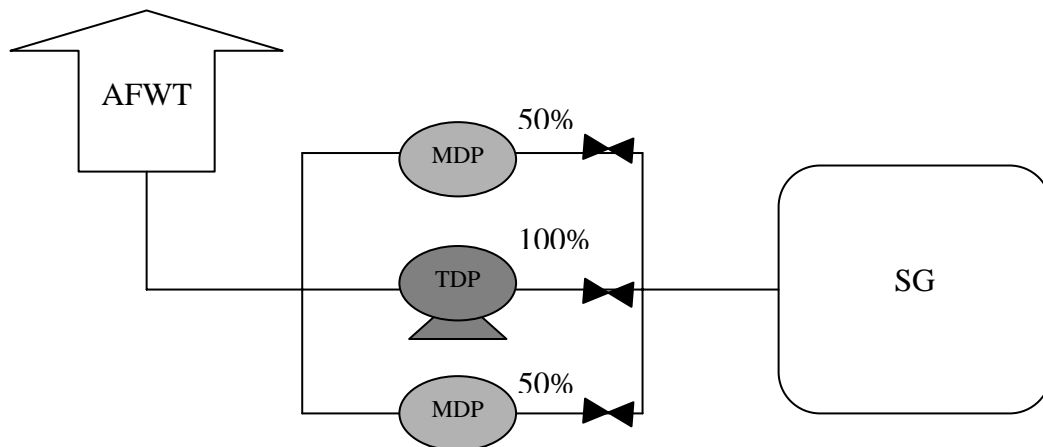


Figura 4.1: Diagrama esquemático do AFWS

De modo a simplificar a análise, algumas considerações serão feitas a respeito do sistema:

- i. A água de alimentação provém somente do tanque auxiliar de água de alimentação;
- ii. Grupos de válvulas redundantes serão representados por uma única válvula;
- iii. Componentes de grupos redundantes serão considerados como sendo um único componente.

Este caso de estudo simplificado tem por objetivo apresentar uma primeira análise comparativa do modelo desenvolvido nesta tese com as abordagens já existentes na literatura. Diante disto, fez-se necessária a adoção destas simplificações para se comparar os modelos baseados em PDEA com o método baseado em inferência fuzzy tradicional (LAPA e GUIMARÃES, 2004a), e com o RPN (BOWLES, 1998).

#### 4.1.1. APLICAÇÃO

De acordo com LAPA e GUIMARÃES (2004a), um grupo composto por cinco especialistas, com vasta experiência junto ao sistema sob análise, foi entrevistado de modo a identificar os modos de falha relacionados com o AFWS.

Na tabela 4.1, estão presentes os dados necessários para que se possa aplicar os modelos (a) baseados no RPN tradicional, (b) baseados em lógica fuzzy pura, LAPA e GUIMARÃES (2004a), (c) baseados em DEA tradicional, discutidos em GARCIA *et al* (2001a, b) e GRACIA (2001), e finalmente baseados no modelo de possibilidades DEA apresentado no capítulo 3 e em GARCIA *et al* (2005).

Os resultados serão comparados de modo a observar as diferenças entre os modelos supracitados, e se os modelos baseados em lógica fuzzy e DEA atendem aos requisitos estabelecidos no Capítulo I.

Os conjuntos fuzzy para cada modo de falha levantado na Tabela 4.1 e as inferências utilizadas para priorizá-los via inferência fuzzy pura estão apresentado nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 (no capítulo 2 desta tese).

Tabela 4.1: Análise dos modos e efeitos de falha (FMEA) para o AFWS

Componente	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeitos	Probabilidade	O	S	D	RPN
Grupo de válvulas	Aberto	1. Falha no sistema automático de fechamento	Queda no desempenho do sistema	1.5E-03/demanda	3 (Baixo)	2 (Baixo)	8 (Alta)	48
Grupo de válvulas	Fechado	1. Emperrado 2. Falha do sistema automático de abertura	Falha do sistema	3.95E-4/demanda	3 (Baixo)	10 (Muito alta)	4 (Moderada)	120
				3.95E-4/demanda	3 (Baixo)	10 (Muito alta)	4 (Moderada)	120
Bomba motorizada	Em operação	1. Falha mecânica 2. Falha elétrica	Redução do nível de potência da planta	1.42E-4/h	3 (Baixo)	6 (Moderada)	2 (Baixo)	36
				1.42E-4/h	3 (Baixo)	6 (Moderada)	2 (Baixo)	36
Bomba motorizada	Demanda	1. Falha no sistema de ignição 2. Cavitação	Redução do nível de potência da planta	5.23E-4/demanda	4 (Moderada)	8 (Alta)	2 (Baixo)	64
				5.23E-4/demanda	4 (Moderada)	8 (Alta)	2 (Baixo)	64
Bomba motorizada	FCC <sup>a</sup>	-----		8.0E-5	2 (Baixo)	8 (Alta)	2 (Baixo)	32
Turbo-bomba	Em operação	1. Falha mecânica		8.1E-3/h	7 (Alta)	4 (Moderada)	4 (Moderada)	112
		2. Falha estrutural da turbina		8.1E-3/h	7 (Alta)	4 (Moderada)	4 (Moderada)	112
	Demanda	1. Falha no sistema de ignição		7.1E-3/demanda	6 (Moderada)	6 (Moderada)	4 (Moderada)	144
		2. Admissão de vapor		7.1E-3/demanda	6 (Moderada)	6 (Moderada)	4 (Moderada)	144
Trens	FCC	-----	Falha do sistema	5.04E-05	2 (Baixo)	10 (Muito alta)	2 (Baixo)	40

<sup>a</sup> Falha de Causa Comum

#### 4.1.2. AVALIAÇÃO DO RPN

Neste caso, podem-se observar os pontos críticos associado ao RPN. Os resultados, considerando-se as informações levantadas, estão apresentados na Tabela 4.1.

Uma observação importante que se deve fazer é que, com a vasta experiência operacional junto ao sistema AFWS, os dados sob análise são muito representativos.

Os RPN obtidos, claramente mostram os problemas levantados por BOWLES e BONNELL (1998). Os modos de falha com respeito à turbo-bomba possuem índices intermediários, enquanto que as falhas de causas comum (CCF) referentes aos trens do sistema, que possuem um efeito potencial catastrófico, possuem um índice de gravidade muito alto, mas em contrapartida possuem um RPN relativamente baixo. Em outras palavras, os modos de falha com potencial catastrófico não são necessariamente priorizados se for considerado o RPN.

Uma característica comum dos modos de falha que apresentam uma gravidade elevada é que estes, devido a cuidados de projeto, possuem baixos índices de ocorrência e de detecção. Tal fato não implica que se deve desprezá-los em detrimento de outros que apresentem valores intermediários destes índices de risco.

#### 4.1.3. AVALIAÇÃO DA INFERÊNCIA FUZZY TRADICIONAL

Conforme previamente mencionado, a experiência operacional adquirida junto ao AFWS também contribuiu para a aquisição de informações junto aos especialistas, isto é, para a obtenção das variáveis lingüísticas a serem consideradas. Devido à experiência adquirida pelos especialistas no que concerne à análise de segurança de sistemas nucleares, as inferências apresentadas na Tabela 2.3 puderam ser levantadas de forma mais concisa. Tendo-se os dados das Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3, que se referem aos conjuntos fuzzy a serem considerados e com as inferências sobre o risco, respectivamente, pode-se alcançar os resultados apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Priorização dos modos de falha por inferência fuzzy

Componente ou subsistema	Modo de falha	O	G	D	RPN	FUZZY	R <sub>r</sub> <sup>a</sup>	R <sub>f</sub> <sup>b</sup>
1 Grupo de válvulas	Aberto	3	2	8	48	2,46	5	6
2 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	120	5	2	3
3 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	120	5	2	3
4 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	36	2,46	7	6
5 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	36	2,46	7	6
6 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	64	4,05	4	4
7 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	64	4,05	4	4
8 Bomba motorizada	CCF	2	8	2	32	3,87	8	5
9 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	96	8,27	3	1
10 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	96	8,27	3	1
11 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	144	8,23	1	2
12 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	144	8,23	1	2
13 Trens	FCC	2	10	2	40	5	6	3

<sup>a</sup> R<sub>r</sub> é a ordenação do modo de falha segundo o RPN

<sup>b</sup> R<sub>f</sub> é a ordenação do modo de falha segundo a inferência fuzzy tradicional

Na tabela 4.2, a coluna indexada por fuzzy apresenta o resultado da defuzzificação do conjunto de saída referente à inferência realizada para este modo de falha. Quanto maior o resultado da defuzzificação, mais crítico é o modo de falha e, conseqüentemente, maior a prioridade a ele associada. A este resultado da defuzzificação dar-se-á o nome de *índice de criticidade fuzzy* (ICF)

É importante observar que os modos de falha 9 e 10, referentes à falha em operação da turbo-bomba, e 11 e 12 referentes à falha na demanda da turbo-bomba, foram os que apresentaram maiores ICF. Note-se também que, após estes modos de falha, os priorizados foram os que apresentaram maior índice de gravidade. Este fato mostra que as regras de inferência determinadas pelos especialistas apresentam uma tendência a considerar a percepção do risco, ou seja, modos de falha que, apesar de suas chances de ocorrência serem baixas, os efeitos associados aos mesmos predominam sobre a opinião dos especialistas.

A característica supracitada é uma das que se está buscando alcançar com a metodologia desenvolvida nesta tese.

Comparando a priorização entre as estabelecidas pelo RPN tradicional e pela inferência fuzzy, pode-se observar a intenção de se considerar como sendo mais críticos os modos de falha que possuem potencial catastrófico. Mas ainda assim, modos de falha com índices de gravidade 10 são considerados menos críticos do que os que possuem uma combinação intermediária dos três índices em consideração.

Um ponto crítico associado a esta abordagem é o fato de ser necessário, apesar de já se ter estabelecido os conjuntos fuzzy, estabelecer os índices numéricos para que a inferência possa ser feita. Em casos em que se está em desenvolvimento de projeto, ou seja, em projeto conceitual ou mesmo em projeto piloto, não se tem dados disponíveis para se determinar um range de variação para os índices de um determinado modo de falha.

É importante lembrar que o que se está buscando não é somente uma priorização baseada unicamente no índice de gravidade, mas sim nas incertezas associadas às opiniões, assim como nas combinações críticas entre os índices de ocorrência de detecção, independentemente do índice de gravidade.

Considerando-se a possibilidade de se estabelecer os valores para os índices de cada modo de falha, pretende-se aplicar o enfoque baseado em Análise Envoltória de Dados (DEA), utilizando-se o modelo desenvolvido em GARCIA *et al* (2001a, b) e GARCIA (2001), e comparar os resultados com os obtidos via inferência fuzzy.

#### 4.1.4. AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS BASEADAS EM DEA

Com a utilização do modelo DEA-APGF, GARCIA *et al* (2001a, b) e GARCIA (2001) consideraram como pertencentes à mesma classe de criticidade os modos de falha que apresentam um alto índice de gravidade isoladamente e os que apresentam índices elevados quando se combinam os índices de ocorrência e detecção. Nesta modelagem, as variáveis lingüísticas provindas de especialistas não são ainda consideradas.

Uma comparação dos resultados obtidos por esta abordagem com os obtidos pelas demais mostra a potencialidade de se utilizar modelos baseados em DEA para priorizar modos de falha junto à classe de problemas mencionados nesta tese, assim como motiva a utilização de uma abordagem DEA que considere as variáveis lingüísticas e as incertezas a elas associadas.

Conforme discutido em GARCIA (2001), diferentes modelos baseados em DEA foram testados no intuito de se considerar os pré-requisitos mencionados no Capítulo I desta proposta, e sanar as deficiências apresentadas nas demais abordagens citadas. O modelo DEA-APGF é uma adaptação do modelo das eficiências dos perfis dos inputs (*input efficiency profile*), apresentado por TOFALLIS (1997). A idéia de se utilizar um modelo que faz uma análise dos perfis está relacionada principalmente com o fraco



poder discriminatório apresentado pelo modelo DEA-CCR tradicional. Os resultados de uma aplicação do modelo CCR são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Priorização dos modos de falha pelo modelo DEA-CCR

Componente ou subsistema	Modo de falha	O	G	D	FUZZY	DEA	R <sub>F</sub>	R <sub>CCR</sub>
1 Grupo de válvulas	Aberto	3	2	8	2,46	1	6	1
2 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	1	3	1
3 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	1	3	1
4 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0.71	6	4
5 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0.71	6	4
6 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0.95	4	2
7 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0.95	4	2
8 Bomba motorizada	CCF	2	8	2	3,87	0.8	5	3
9 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	1	1	1
10 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	1	1	1
11 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	1	2	1
12 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	1	2	1
13 Trens	CCF	2	10	2	5	1	3	1

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 confirmam que o modelo DEA-CCR atribui um elevado índice de criticidade ao modo de falha que apresente um valor elevado em qualquer um dos índices considerados, isto é, um modo de falha que apresente baixos índices de ocorrência e gravidade e um elevado índice de detecção será considerado 100% crítico. O mesmo ocorrerá com qualquer outra combinação deste tipo.

Um outro contratempo associado ao modelo DEA-CCR, quando comparado com as demais abordagens apresentadas, está associado ao seu baixo poder discriminatório, isto é, o modelo DEA-CCR tende a considerar quase todos os modos de falha como sendo 100% críticos, não auxiliando de forma efetiva para uma tomada de decisão.

Para o modelo DEA-APGF, o que se faz é uma análise do perfil da gravidade, isto é, o perfil da criticidade fixando-se a gravidade do modo de falha. Neste modelo, a criticidade do modo de falha é obtida a partir da média das criticidades parciais considerando-se os índices de ocorrência e gravidade e, posteriormente, de gravidade e detecção, conforme apresentado no Capítulo III.

A aplicação do modelo DEA-APGF para priorizar os modos de falha levantados para o AFWS é apresentada na Tabela 4.4. Nesta aplicação, pode-se perceber que os modos de falha com potencial catastrófico foram considerados como sendo 100% críticos, ou seja, foi-lhes atribuído um índice de criticidade igual a 1.

Tabela 4.4: Priorização dos modos de falha pelo modelo APGF

Componente ou subsistema	Modo de falha	O	G	D	FUZZY	DEA APGF	R <sub>F</sub>	R <sub>APGF</sub>
1 Grupo de válvulas	Aberto	3	2	8	2,46	0.72	6	6
2 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	1	3	1
3 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	1	3	1
4 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0.66	6	7
5 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0.66	6	7
6 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0.88	4	3
7 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0.88	4	3
8 Bomba motorizada	CCF	2	8	2	3,87	0.80	5	5
9 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	0.83	1	4
10 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	0.83	1	4
11 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	0.89	2	2
12 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	0.89	2	2
13 Trens	CCF	2	10	2	5	1	3	1

Observando os resultados, os modos de falha cujos índices são 4, 8 e 2, e 6, 6 e 4, para ocorrência, gravidade e detecção, respectivamente, auxiliarão a compreender a filosofia que se encontra por trás do modelo APGF.

O modo de falha cujos índices de ocorrência, gravidade e detecção são 4, 8 e 2, respectivamente, não foi considerado tão crítico quanto o que apresenta estes mesmos índices iguais a 6, 6 e 4. O motivo para isto pode ser mais facilmente compreendido se os resultados forem analisados de forma gráfica, GARCIA *et al* (2005). As figuras 4.2 e 4.3 apresentam as criticidades parciais dos modos de falha considerados para o AFWS.

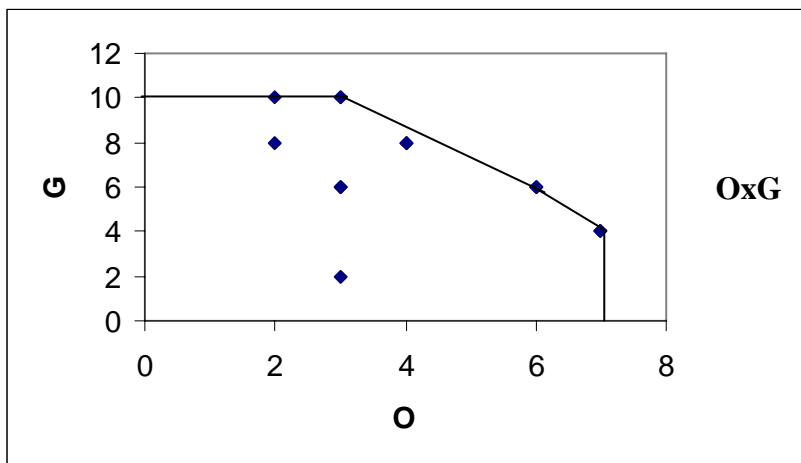


Figura 4.2: Perfil da criticidade para ocorrência e detecção

Neste perfil pode-se perceber que 4 modos de falha estão sobre a fronteira de criticidade 100%. Estes modos de falha apresentam índices de ocorrência e gravidade iguais a 3 e 10, 2 e 10, 6 e 6, e 7 e 4.

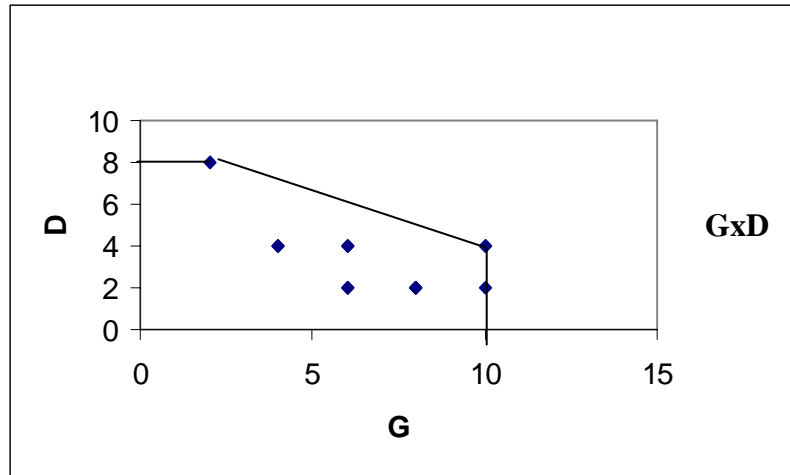


Figura 4.3: Perfil da criticidade para gravidade e detecção

Neste segundo perfil, somente três diferentes modos de falha foram considerados como sendo 100% críticos, isto é, os modos de falha que apresentam os índices de gravidade e detecção iguais a 2 e 8, 10 e 4, e 10 e 2, respectivamente.

De acordo com o conceito de distância utilizado para medir a criticidade, os modos de falha que se encontram no interior da fronteira de criticidade, principalmente os que estão sendo considerados para esta análise particular, apresentam diferentes valores para suas criticidades parciais, afetando assim a sua criticidade final. Note-se que o modo de falha que apresenta os seus índices iguais a 6, 6 e 4, no perfil ocorrência e gravidade, se encontra sobre a fronteira de criticidade 100%. Este fato contribui para que a criticidade média final seja maior do que a do outro, que apresenta os mesmos índices iguais a 4, 8 e 2.

#### 4.1.5. AVALIAÇÃO DO MODELO PCCR

Considerando-se os conjuntos fuzzy para cada um dos índices utilizados na FMEA e aplicando diretamente o modelo de possibilidades CCR para priorizar os modos de falha, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 4.5. Estes resultados foram obtidos levando-se em conta as considerações apresentadas no capítulo 3.

Tabela 4.5: Priorização dos modos de falha pelo modelo PCCR

Componente ou subsistema	Modo de falha	O	G	D	FUZZY	PCCR	R <sub>F</sub>	R <sub>PCCR</sub>
1 Grupo de válvulas	Aberto	3	2	8	2,46	0,45	6	4
2 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	0,45	3	4
3 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	0,45	3	4
4 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0,45	6	4
5 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0,45	6	4
6 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0,57	4	3
7 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0,57	4	3
8 Bomba motorizada	CCF	2	8	2	3,87	0,45	5	4
9 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	0,91	1	1
10 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	0,91	1	1
11 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	0,74	2	2
12 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	0,74	2	2
13 Trens	CCF	2	10	2	5	0,45	3	4

Como já era de se esperar, assim como o modelo CCR tradicional, o modelo PCCR também fornece uma pobre discriminação entre os modos de falha, ou seja, considera modos de falha com características totalmente diferentes como sendo igualmente críticos. Este fato já foi mencionado quando foram avaliados os modelos DEA tradicionais, GARCIA (2001).

Por este motivo, resolveu-se adaptar o modelo DEA-APGF para tratar variáveis fuzzy, ou seja, utilizar-se-á o modelo de possibilidades de agregação parcial com gravidade fixa (PAPGF).

$$\tilde{c}r_i = \frac{1}{2}(\tilde{c}r_{OSi} + \tilde{c}r_{SDi}) \quad (4.1)$$

onde as parcelas do lado direito são as criticidades parciais fuzzy combinando ocorrência de gravidade, e gravidade e detecção, conforme o modelo APGF *crisp*.

Os resultados da aplicação do modelo PAPGF estão apresentados na Tabela 4.6.

É interessante notar que o modelo proposto prioriza os modos de falha de forma semelhante ao método baseado em inferência fuzzy tradicional. O modelo PAPGF considerou os modos de falha cujos índices são “moderados”. Este fato pode ser explicado pelas incertezas associadas a esta variável lingüística. O intervalo de variação da variável “moderado” é o maior dentre as demais variáveis. Em outras palavras, este fato mostra para o tomador de decisões que estudos mais aprofundados devem ser

realizados junto a estes modos de falha, para se adquirir informações mais detalhadas a respeito.

Tabela 4.6: Priorização dos modos de falha pelo modelo PAPGF

Componente ou subsistema	Modo de falha	O	G	D	FUZZY	PAPGF	R <sub>F</sub>	R <sub>PAPGF</sub>
1 Grupo de válvulas	Aberto	3	2	8	2,46	0,45	6	6
2 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	0,68	3	3
3 Grupo de válvulas	Fechado	3	10	4	5	0,68	3	3
4 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0,51	6	5
5 Bomba motorizada	Operação	3	6	2	2,46	0,51	6	5
6 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0,66	4	4
7 Bomba motorizada	Demanda	4	8	2	4,05	0,66	4	4
8 Bomba motorizada	CCF	2	8	2	3,87	0,51	5	5
9 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	0,86	1	1
10 Turbo-bomba	Operação	7	4	4	8,27	0,86	1	1
11 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	0,74	2	2
12 Turbo-bomba	Demanda	6	6	4	8,23	0,74	2	2
13 Trens	CCF	2	10	2	5	0,51	3	5

Comparando os resultados obtidos pelos diferentes métodos apresentados nesta proposta, percebe-se que os resultados obtidos pelo modelo de inferência fuzzy tradicional e o modelo PAPGF são muito parecidos, à exceção dos eventos 4, 5 e 13.

Tabela 4.7: Comparação entre os diferentes métodos de priorização

Event	R <sub>RPN</sub>	R <sub>FUZZY</sub>	R <sub>CCR</sub>	R <sub>APGF</sub>	R <sub>PCCR</sub>	R <sub>PAPGF</sub>
1	5	6	1	6	4	6
2	2	3	1	1	4	3
3	2	3	1	1	4	3
4	7	6	4	7	4	5
5	7	6	4	7	4	5
6	4	4	2	3	3	4
7	4	4	2	3	3	4
8	8	5	3	5	4	5
9	3	1	1	4	1	1
10	3	1	1	4	1	1
11	1	2	1	2	2	2
12	1	2	1	2	2	2
13	6	3	1	1	4	5

Vale ressaltar que a modelagem PAPGF para priorizar os modos de falha dispensa a necessidade de se estabelecer inferências do tipo SE ... ENTÃO. Comparando as técnicas baseadas em lógica fuzzy e fuzzy DEA com a abordagem baseada unicamente

em DEA, pode-se ver que os resultados obtidos pelos modelos baseados em DEA não consideram as incertezas associadas às informações providas dos especialistas, que é uma característica importante.

As incertezas refletem o grau de desconhecimento, por parte dos especialistas, sobre um determinado modo de falha. Em termos de recomendações para os modos de falha cujos índices, para o presente caso, são todos moderados, estas devem salientar a necessidade de se investir em pesquisas de reconhecimento, por meio de identificação de *banchmarks*, de modo a adquirir informações *a priori* sobre os respectivos modos de falha.

O valor lingüístico moderado é o que apresenta a maior incerteza dentre as demais. De acordo com os especialistas, o valor “moderado” tem um intervalo de variação de [4,1; 8,1].

Por meio deste estudo de caso simplificado, pode-se afirmar que a utilização de modelos híbridos, combinando variáveis fuzzy com análise envoltória de dados, representa uma alternativa potencial no auxílio à tomada de decisão envolvendo risco e, conseqüentemente, incertezas. Sua maior característica está associada ao fato de não ser necessária a utilização de fatores empíricos. Esta característica é uma grande vantagem, principalmente quando se está comparando os modos de falha levantados numa FMEA de um sistema em fase conceitual.

No intuito de avaliar de forma mais completa o método proposto, na próxima seção aplicar-se-á o modelo PAPGF num caso onde é considerado um maior número de modos de falha.

#### 4.2. APLICAÇÃO DO MODELO PAPGF NOS DADOS DO SISTEMA DE CONTROLE QUÍMICO E VOLUMÉTRICO

Conforme previamente mencionado, os dados referentes aos estudos de caso são provenientes de LAPA e GUIMARÃES (2004a, b).

Um diagrama simplificado do sistema de controle químico e volumétrico (CVCS) é apresentado na figura 1.

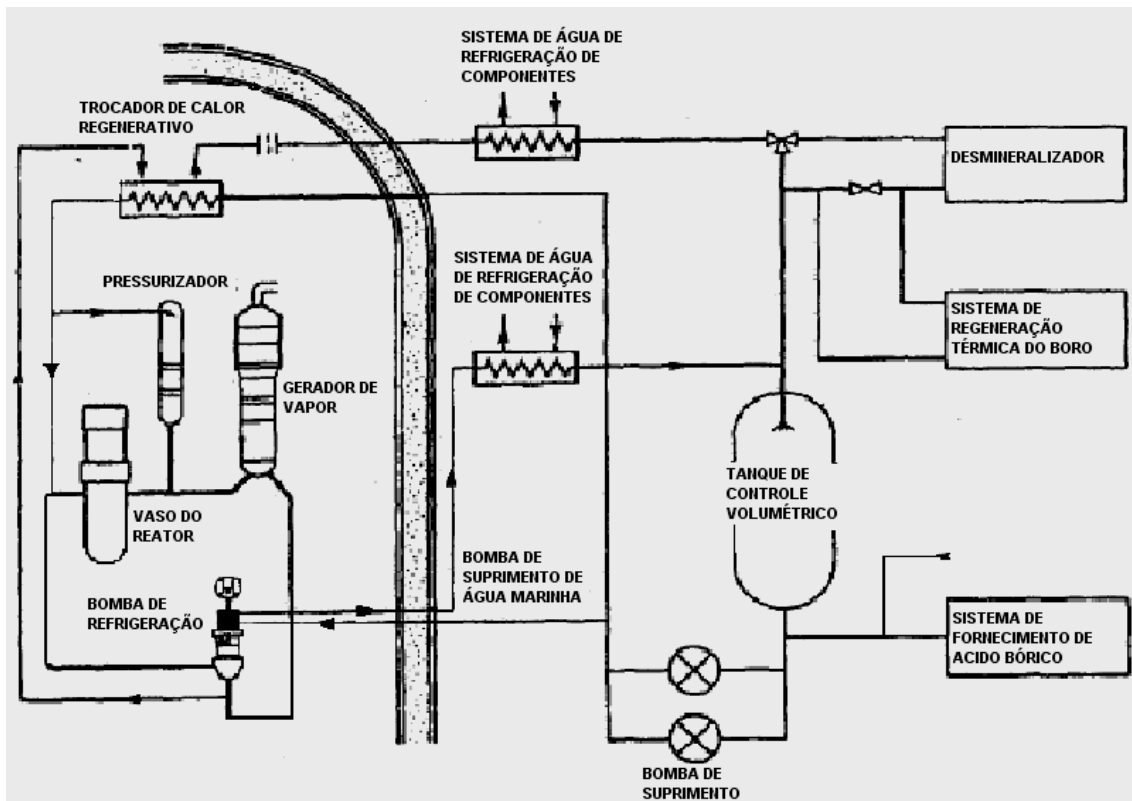


Figura 4.4: Esquema simplificado do CVCS (LAPA e GUIMARÃES, 2004b)

O subsistema primário, que será tratado nesta tese, é composto pelas seguintes partições principais:

- Sistema de carga e descarga de refrigerante;
- Purificação e controle químico do refrigerante;
- Sistema de regeneração térmica do boro;
- Tanque de armazenagem de controle de volume;
- Fornecimento de ácido bórico;
- Suprimento das bombas;
- Injeção de água marinha para as bombas de refrigeração do reator.

Muitos dos componentes estão localizados fora do prédio da contenção, podendo, devido à degradação destes componentes, contribuir para a liberação de refrigerante.

O CVCS de um PWR tem funções características tanto para operações normais quanto para situações de emergência. Em operação normal, as três funções básicas são

de purificação do refrigerante, controle do inventário de refrigerante do reator e suprimento da bomba de refrigeração do reator.

Em situações de emergência, as funções primárias da maioria das usinas do tipo PWR provêm alta pressão para o sistema de injeção de segurança, ao sistema de refrigeração do reator e aumentar a concentração de boro. Maiores detalhes sobre o CVCS podem ser encontrados em GROVE & TRAVIS (1995).

#### 4.2.1. APLICAÇÃO DO MODELO PAPGF

Considerando-se as características mencionadas na seção anterior, a respeito do CVCS, LAPA e GUIMARÃES (2004b) realizaram uma FMEA para este sistema e levantaram um total de 82 modos de falha. É importante ressaltar que, novamente, algumas simplificações estão sendo feitas na análise do sistema. Estas simplificações são extremamente adequadas quando se está testando uma nova abordagem metodológica, como é o caso desta tese.

As planilhas de FMEA para o CVCS podem ser vistas em LAPA & GUIMARÃES (2004b). As variáveis lingüísticas utilizadas neste caso são as mesmas que foram utilizadas no caso do AFWS, e que foram apresentadas no Capítulo II. Na tabela 4.8, R, B, M, A, MA estão associadas às variáveis: remoto, baixo, moderado, alto e muito alto, respectivamente.



Tabela 4.8: Variáveis lingüísticas associadas aos modos de falha do CVCS

Modo de falha	O	G	D	Modo de falha	O	G	D
1	B	M	M	42	M	A	A
2	M	A	A	43	B	A	A
3	M	M	B	44	M	A	A
4	M	M	B	45	B	M	B
5	B	M	M	46	M	M	M
6	B	M	M	47	B	M	M
7	B	A	A	48	M	A	M
8	M	MA	MA	49	M	M	M
9	B	M	B	50	M	M	M
10	M	M	B	51	B	M	M
11	B	M	M	52	M	M	M
12	M	M	M	53	M	M	M
13	M	MA	B	54	M	M	M
14	M	MA	B	55	M	M	M
15	B	A	M	56	M	A	M
16	B	A	M	57	M	A	M
17	B	M	M	58	M	A	M
18	M	A	A	59	M	M	M
19	B	M	B	60	M	M	M
20	B	M	B	61	M	M	M
21	B	M	B	62	M	A	M
22	R	M	M	63	M	R	M
23	R	A	M	64	M	M	M
24	B	MA	M	65	M	M	M
25	B	B	M	66	M	M	M
26	B	B	M	67	M	M	M
27	B	MA	M	68	M	M	M
28	B	A	A	69	M	M	M
29	M	B	M	70	M	M	M
30	B	M	M	71	M	M	M
31	M	A	M	72	M	M	M
32	B	M	M	73	B	M	M
33	M	M	M	74	B	R	M
34	B	M	M	75	M	M	M
35	M	A	M	76	M	M	M
36	M	MA	M	77	M	A	M
37	B	A	A	78	M	A	M
38	R	M	B	79	M	M	M
39	B	M	M	80	M	M	M
40	B	M	B	81	B	M	M
41	B	A	A	82	B	R	M

Como no universo de discurso em questão estão presentes cinco conjuntos de variáveis, o número máximo de permutações para os três índices a serem considerados é 125 (5 – referente à ocorrência – x 5 – referente à gravidade – x 5 – referente à detecção). Diante desta limitação, que é característica quando se está considerando variáveis lingüísticas e suas incertezas, haverá modos de falha com combinações iguais

de seus índices. Nestas situações pode-se separá-los em classes de modos de falha (GARCIA *et al.* 2006).

No caso dos modos de falha levantados para o caso simplificado do CVCS, foram levantadas 19 classes distintas de modos de falha (Tabela 4.9).

Tabela 4.9: Classes com as mesmas características

<b>Grupos</b>	<b>O</b>	<b>G</b>	<b>D</b>
1	B	A	A
2	B	A	M
3	B	B	M
4	B	M	B
5	B	M	M
6	B	MA	M
7	B	R	M
8	M	A	A
9	M	A	M
10	M	B	M
11	M	M	B
12	M	M	M
13	M	MA	B
14	M	MA	M
15	M	MA	MA
16	M	R	M
17	R	A	M
18	R	M	B
19	R	M	M

Aplicando primeiramente o modelo PCCR simples têm-se os resultados apresentados na Tabela 4.10, considerando-se 10 níveis de pertinência.

Tabela 4.10: Priorização dos modos de falha pelo modelo PCCR

<b>Grupos</b> $\alpha^a$	<b>0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>	<b>Média</b>	<b>R<sub>PCCR</sub></b>
1	1,22	1,14	1,06	1,03	1	0,97	0,95	0,92	0,89	0,86	0,84	0,989091	3
2	1,22	1,14	1,06	1,03	1	0,97	0,95	0,92	0,89	0,86	0,84	0,989091	3
3	1,22	1,14	1,06	0,99	0,92	0,86	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,880909	5
4	1,22	1,14	1,06	0,99	0,92	0,86	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,880909	5
5	1,22	1,14	1,06	0,99	0,92	0,86	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,880909	5
6	1,22	1,14	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,01	1	1,07	2
7	1,22	1,14	1,06	0,99	0,92	0,86	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,880909	5
8	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
9	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
10	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
11	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
12	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
13	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
14	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
15	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
16	1,98	1,84	1,72	1,61	1,5	1,4	1,31	1,23	1,15	1,07	1	1,437273	1
17	1,12	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,95	0,92	0,89	0,86	0,84	0,975455	4
18	0,91	0,87	0,84	0,8	0,77	0,73	0,7	0,67	0,64	0,61	0,58	0,738182	6
19	0,91	0,87	0,84	0,8	0,77	0,73	0,7	0,67	0,64	0,61	0,58	0,738182	6

a - Nível de pertinência

Note-se que, no presente caso, a discriminação dos modos de falha foi um pouco melhor, mas ainda assim, é precária, sem dar a devida importância ao índice de gravidade. Conforme mencionado na aplicação do AFWS, qualquer um dos modos de falha que apresente um único índice relativamente mais elevado do que os demais, o modelo PCCR atribuirá ao mesmo um índice de criticidade relativamente elevado.

Aplicando o modelo PAPGF, no intuito de salientar a importância do índice de gravidade, tem-se a priorização apresentada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Priorização dos modos de falha pelo modelo PAPGF

<b>Grupos</b>	<b>PAPGF</b>	<b>R<sub>PAPGF</sub></b>	<b>Grupos</b>	<b>PAPGF</b>	<b>R<sub>PAPGF</sub></b>
<b>1</b>	0,982773	3	<b>11</b>	0,809864	7
<b>2</b>	0,982773	3	<b>12</b>	0,809864	7
<b>3</b>	0,810773	6	<b>13</b>	1,065091	1
<b>4</b>	0,811682	5	<b>14</b>	1,065091	1
<b>5</b>	0,811682	5	<b>15</b>	1,065091	1
<b>6</b>	1,065091	1	<b>16</b>	0,809864	7
<b>7</b>	0,809864	7	<b>17</b>	0,975955	4
<b>8</b>	0,983227	2	<b>18</b>	0,7385	8
<b>9</b>	0,983227	2	<b>19</b>	0,7385	8
<b>10</b>	0,809864	7	-	-	-

É importante notar nesta priorização que como está sendo considerada a incerteza da opinião do especialista, em muitos casos as variáveis consideradas têm interseção entre si. Devido a isto, pode-se observar a presença de modos de falha com índices de criticidade iguais.

#### 4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme mencionado no capítulo anterior, com a aplicação do modelo desenvolvido nesta tese, não é necessário nem a utilização de regras de inferência, nem a atribuição de um valor numérico específico para cada índice para que se alcance uma priorização dos modos de falha considerando-se a opinião de especialistas e suas incertezas.

Um fato incontestável em ambas as abordagens, inferência fuzzy e PAPGF, é o fraco poder discriminatório. No caso do sistema de controle químico e volumétrico (CVCS), onde foram identificados 82 modos de falha, somente 8 classificações de risco foram determinadas, como na inferência fuzzy tradicional, LAPA e GUIMARÃES (2004b).

Esta característica de ambas as abordagens é justificada pela consideração das incertezas associadas às variáveis lingüísticas e pelo número de conjuntos presentes no universo de discurso. Vale ressaltar a dificuldade em se estabelecer vários conjuntos para classificar os índices dos modos de falha. Se esta possibilidade fosse viável, certamente não se estaria considerando variáveis lingüísticas, pois ter-se-ia uma precisão que não é características quando se trata um problema por meio de opinião de especialistas.

Em outras palavras, não se deve esperar um forte poder discriminatório entre os modos de falha quando se está diante de muitas incertezas. A priorização dos modos de falha, em casos como este, tem por principal objetivo levantar os pontos críticos e, conseqüentemente, focar as atenções nos mesmos quando do desenvolvimento do projeto.

Uma expectativa diferenciada é associada quando se tem uma maior abundância de informações sobre o sistema, onde dados mais concretos estão disponíveis. Em casos como estes, o que se deseja é estabelecer um critério para focar esforços em manutenção (ZWIGELSTEING, 1998).

## CAPÍTULO V

*O saber faz o homem ponderado e insinuante...  
(Montesquieu)*

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente capítulo, são apresentadas as conclusões que puderam ser obtidas nesta tese, e em seguida são feitas recomendações para trabalhos futuros de pesquisa.

#### 5.1. CONCLUSÕES

Quando se realiza uma FMEA para propósitos de segurança, não se deve ater a grandes precisões dos dados, principalmente quando se está analisando um sistema em sua fase de projeto, ou seja, em fase conceitual, PILLAY e WANG (2003). Para análises como estas, recomenda-se que se levantem informações de especialistas.

O uso de variáveis lingüísticas, provindas de especialistas, fornece informações significativas com respeito ao sistema e aos índices utilizados para classificar os modos de falha. Para tais variáveis, a consideração das incertezas associadas é fator importante, pois reflete o grau de conhecimento do sistema sob análise.

As vantagens observadas pela utilização de um modelo híbrido, combinando os conceitos de lógica fuzzy e análise envoltória de dados, podem ser resumidas da seguinte forma:

- Pode ser aplicado em fase inicial de projeto, onde a massa de dados é escassa e imprecisa;
- É uma técnica que combina, de forma organizada, o conhecimento dos especialistas, assim como as incertezas associadas aos mesmos;
- A flexibilidade em se definir os pesos associados com cada fator provê uma maneira de se verificar, por meio do modelo DEA, quais índices estão contribuindo de forma mais efetiva para a sua criticidade;
- Com a utilização do modelo PAPGF torna-se desnecessário o estabelecimento de regras de inferências que levem uma combinação de inputs ao universo dos conjuntos de saída;

- Não é necessário que se tenha um índice específico para que se possa inferir sobre o grau de criticidade dos modos de falha, como é o caso da inferência fuzzy tradicional;
- Os resultados obtidos pela abordagem proposta são relativos, isto é, é uma abordagem onde os resultados são dependentes do conjunto de modos de falha sob análise.

Um fator importante associado com a abordagem proposta é que os modos de falha com características diferentes não são priorizados da mesma forma. Somente modos de falha em que o índice de gravidade é relativamente elevado e modos de falha que possuem uma combinação de índices de ocorrência e detecção, relativamente elevados, são considerados 100% críticos.

## 5.2. RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista a potencialidade observada em se utilizar modelos baseados em DEA para comparar os riscos entre diferentes entidades (modos de falha, tecnologias etc.) o que se propõe que seja estudada é a possibilidade de se utilizar esta abordagem para identificar fatores de melhoria em processos. Tendo em vista que os modelos DEA estabelecem um conjunto de pesos que maximizam a eficiência ou, dependendo da ótica, a ineficiência, como foi o caso aplicado nesta tese, o que se propõe é que seja estabelecida uma abordagem onde se possam identificar os pontos eficientes e, a partir destes, estabelecer pontos de melhoria no sistema sob análise.

Observe-se que, provavelmente, nesta abordagem a utilização de variáveis lingüísticas pode ser dispensada, tendo em vista que o sistema está operacional e informações sobre o mesmo estão disponíveis. Num segundo passo, no intuito de avaliar as modificações, ainda em fase conceitual, possa ser interessante a abordagem de variáveis lingüísticas.

Como a pesquisa está em constante evolução, o que se propõe é verificar a viabilidade de se combinarem as técnicas baseadas em DEA com as baseada em análise relacional grey (GRA) (DENG, 1989 e GARCIA et al, 2005b, c).

Propõe-se também o desenvolvimento de um sistema computacional onde possam ser armazenadas as opiniões de diversos especialistas sobre os conjuntos fuzzy a serem considerados. Com base neste agregado de informações, ter-se-ia a facilidade de

escolher entre os níveis de pertinência a serem considerados, assim com o tipo de modelo a ser utilizado, podendo-se, com isto, comparar os resultados das diferentes abordagens apresentadas nesta tese.

Propõe-se também que se verifique a possibilidade de se trabalhar com otimização estocástica, ou seja, ao invés de se tratar via lógica fuzzy, considerar a opinião de especialistas que, conforme proposto por Mosleh e Apostolakis (1984), tende a se comportar como uma distribuição lognormal. Diante disto, poderia se considerar as opiniões como sendo variáveis aleatórias e estabelecer um modelo DEA estocástico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, M. A. B., MARTINEZ, A. S., SCHIRRU, R. (1997). “Adaptative vector quantization optimized by genetic algorithms for real time diagnosis through fuzzy sets” *Nuclear Technology*, v.120, n. 3, pp. 188-197.
- BLANCHARD, B. S., 1998. *System engineering management*, 2 ed., NY, Wiley.
- BOWLES, J. B. e PELÁEZ, C. E. 1995. “Fuzzy logic prioritization in a system failure mode, effect and criticality analysis”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 50, n. 2, pp 203-213.
- BOWLES, J. B. e PELÁEZ, C. E. 1996. “Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis”, *Information Science*, v. 88, n. 1-4, pp. 177-199.
- BOWLES, J.B. and BONNELL, R. D. 1998. “Failure Mode Effects and Criticality Analysis: What it is and How to use it”, in Topics in Reliability & Maintainability & Statistics, *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Anaheim, CA, January, 32 p.
- BOWLES, J. B. 1998, “The new SAE FMECA standard”, In: *IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp 48-53
- BOWLES, J. B. 2003. “An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis”, In: *IEEE Proceedings annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 380-386.
- CHAPOT, J. L. C., SILVA, F. C. e SCHIRRU, R. (1999), “A new approach to the use of genetic algorithms to solve pressurized water reactor’s fuel management optimization problem”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 26, n. 7, pp. 641-655.



- CHARNES, A., COOPER, W. W., RHODES, E., 1978. "Measuring The Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research*, n. 2, p.429-444.
- CHARNES, A., COOPER, W. W., SEIFORD, L., STUTZ, J., 1982, "A Multiplicative Model for Efficiency Analysis", *Socio-Economic Planning Science*, v.2, p.223-224.
- CHARNES, A. & COOPER, W. W., 1990, "Data Envelopment Analysis", *Operacional Research*, v.90, p.641-645.
- CHARNES, A., COOPER, W. W., RHODES, E., 1991, "Evaluating Program and Managerial Efficiency: An Application of Data Envelopment Analysis to Program Follow Through", *Management Science*, v.27, n.6, p.668-697.
- DE SOUZA, D. P. H., 2003, *Avaliação de métodos paramétricos e não paramétricos na análise de eficiência da produção de leite*, Tese de D.Sc., Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP.
- DENG, J. (1989), "Introduction to grey system theory", *Journal of Grey System*, Vol. 1, No. 1, pp. 1 – 24.
- EPRI (1996). *Risk informed inservice inspection evaluation procedure*, Electric Power Research Institutur. TR-106706.
- FARRELL, M. J., 1957, "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of the Royal Statistical Society*, Series A, part III, p.253-290.
- FABER, M. H. e STEWART, M. G., (2003), "Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion", *Reliability Engineering and System Safety* v. 80, n. 2, pp. 173-184.
- FULLWOOD, R. R., 2000. *Probabilistic risk assessment in chemical and nuclear industries*, MA, Butterworth-Heinemann.

- GARCIA, P. A. A., 2001, *Aplicação de análise envoltória de dados no processo de manutenção centrada em confiabilidade*. Dissertação de M.Sc., Departamento de sistemas e computação, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- GARCIA, P. A. A., LUZ, V. e NEVES, J. C. S., 2001a, “Aplicação de um modelo DEA para priorizar modos de falha”, In: *XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Salvador, Bahia, Brasil.
- GARCIA, P. A. A., NEVES, J. C. C. e NEVES, G. C. 2001b, “DEA: uma nova abordagem para a análise dos modos e efeitos de falha no RCM”, In: *Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, Centro de Análise de Sistemas Navais, Rio de Janeiro.
- GARCIA, P. A. A., NEVES, J. C. C. e NEVES, G. C. 2002. “Avaliação dos modos e efeitos de falha no RCM utilizando DEA”, In: *XI Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación de Operaciones*, Conceição, Chile.
- GARCIA, P. A. A., SCHIRRU, R., FRUTUOSO e MELO. 2004, “A multiobjective genetic algorithm for the optimization of nuclear safety system test and cost policies”, In: *VII Encontro de Modelagem Computacional*, Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Nova Friburgo – RJ.
- GARCIA, P. A. A., SCHIRRU, R., FRUTUOSO e MELO, P. F. F. (2005), “A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA”, *Progress in Nuclear Energy – Edição Especial (Lessons Learned from Computational Intelligence in Nuclear Applications)*
- GARCIA, P. A. A., VARANDA, G, FRUTUOSO e MELO, P. F. F. (2005a), “Uma abordagem baseada em FMEA com um modelo de envelopamento de dados para propor melhorias em segurança”, In: *International Nuclear Atlantic Conference - ENFIR*, Santos - SP

- GARCIA, P. A. A. e FRUTUOSO e MELO, P. F. F. (2005b), “Aplicação de um modelo grey DEA à análise comparativa de riscos entre tecnologias de geração de energia”, In: *International Nuclear Atlantic Conference- ENFIR*, Santos – SP
- GARCIA, P. A. A.; NEVES, Júlio C. S.; JACINTO, Carlos M. C. e DROGUETT, Enrique, L. (2005c), “Aplicação de análise relacional grey no gerenciamento da cadeia logística”, In: *XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Gramado-RS.
- GARCIA, P. A. A., FRUTUOSO e MELO, P. F. F. e SCHIRRU, R. (2006). “A fuzzy DEA model based approach to criticality establishment: an application to chemical and volumetric control system”, *Annals in Nuclear Energy* (a ser submetido).
- GARCIA, P. A. A. e FRUTUOSO e MELO, P. F. F. (2006). “A hybrid Pareto-DEA approach in a multi-objective GA for optimizing nuclear safety system periodic test scheduling considering availability and cost”, *Annals in Nuclear Energy* (a ser submetido).
- GROVE E. J. and TRAVIS, R. J. (1995), Effect of aging on the PWR chemical and volumetric control system, NUREG/CR-5954, BNL-NUREG-52410.
- GUO, P. e TANAKA, H. (2001), “Fuzzy DEA: a perceptual evaluation method”, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 119, pp. 149-160.
- IAEA (1992). *Procedure for conducting probabilistic safety assessments of nuclear power plants (level 1), a safety practice*. Safety series No. 50-P-4, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (1999). *Living probabilistic safety assessment (LPSA)*. Technical Document 1106, International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA (2001). *Applications of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plant*. Technical Document 1200, International Atomic Energy Agency, Vienna.

- IAEA (2002). Procedure for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities. Technical Document 1267, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- KAHRAMAN, C. and TOLGA, E. (1998). “Data envelopment analysis using fuzzy concept”, 28<sup>o</sup> International Symposium on Multiple-Valued Logic, pp. 338-343.
- KAO, C. e LIU, S., T. (2000). “Fuzzy efficiency measures in data envelopment analysis”, *Fuzzy Sets and Systems*, v.113, pp. 427-437.
- LAPA, C. M. F. e GUIMARÃES, A. C. F., 2004a. “Effect analysis fuzzy inference system in nuclear problems using approximate reasoning”, *Annals of Nuclear Energy*, 31, pp. 107-115.
- LAPA, C. M. F. e GUIMARÃES, A. C. F., 2004b, “Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volumetric control system”, *Progress in Nuclear Energy*, v. 44, 31, pp. 191-213.
- LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. e MOL, A. C. A. (2000), “Maximization of a nuclear system availability through maintenance scheduling optimization using a genetic algorithm”, *Nuclear Energy and Design* 196, pp. 219-231.
- LERTWORASIRIKUL, S. (2001), *Fuzzy data envelopment analysis for supply chain modeling and analysis*, Dissertation Proposal in Industrial Engineering, North Carolina State University.
- LERTWORASIRIKUL, S., *et al.* (2003), “Fuzzy data envelopment analysis: a possibility approach”, *Fuzzy Sets and System*, v. 139, pp. 379-394.
- LINS, M. P. E. e MEZA, L. A., 2000. Análise Envoltória de Dados e Perspectivas de Integração no Ambiente de Apoio à Decisão. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

- MAEDA, Y., ETANI, T. e TANAKA, H. (1998). *Fuzzy DEA with interval efficiency*, 6<sup>th</sup> European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Vol. 2, pp. 1067-1071.
- MARCONI, M. e LAKATOS, E. M., 2003. *Fundamentos de metodologia científica*, 5<sup>a</sup> Ed. Atlas S. A. São Paulo.
- MEZA, L. A., 1998. *Data Envelopment Analysis (DEA) na determinação da eficiência de programas de Pós-graduação da COPPE/UFRJ*, Tese de D.Sc., Programa de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Military Standard 1629A, 1984. *Procedure for performing a failure modes effects and criticality analysis*, US Department of Defense.
- MOITA, M. H. V., 1995. *Medindo a eficiência relativa de escolas municipais da cidade do Rio Grande-RS usando a abordagem DEA (Data Envelopment Analysis)*, Dissertação de M.Sc., Programa de pós-graduação em engenharia de produção e sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina – RS.
- MOSLEH, A. and APOSTOLOAKIS, G., 1984. In: *Low-Probability/High-consequence Risk Analysis*, edited by R. A. Waller and V. T. Civallo (Plenum Press, New York)".
- NEVES, J. C. S., 2000. *Aplicação de análise envoltória de dados para avaliação de fornecedores*, Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- NEVES, J. C. S., SANTOS, J. A. N., QASSIM, R. Y., 1999, "Aplicação do modelo multicritério DEA para avaliação da cadeia logística (Supply Chain)", In: *XXXI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, SOBRAPO, Juiz de Fora – MG.
- NUNES, M. S., 1999. *Análise dos modos e efeitos de falha de produto com utilização do desdobramento da função qualidade*, Dissertação de M.Sc., departamento de sistemas e computação, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

- PEREIRA, C. M. N. A., SCHIRRU, R. e MARTINEZ, A. S. (1999). “Basic investigations related to genetic algorithms in core designs”, *Annals of Nuclear Energy* v. 26, n. 3, pp. 173-193.
- PILLAY, A. e WANG, J., 2003. “Modified failure mode and effect analysis using approximate reasoning”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 79, pp. 69-85
- QS-9000 – Instituto de Qualidade Automotiva, 1997. *Análise dos modos e efeitos de falha em processo e Análise dos modos e efeitos de falha em produtos*, Manual de Referência.
- SHAW, I. S. e M. G. SIMÕES (1999). *Controle e Modelagem Fuzzy*. FAPESP, Editora Edgard Blücher LTDA
- SENGUPTA, J. K. (1992). “A fuzzy system approach in data envelopment analysis”, *Comput. Math. Appl.*, v. 24, pp. 259-266.
- TOFALLIS, Chris, 1997. “Input efficiency profiling: an application to airlines”, *Computers Operational Research*, v. 24, n. 3, pp. 253-258.
- XU, K., TANG, L. C., XIE, M., HO, S. L., ZHU, M. L., 2002. “Fuzzy assessment of FMEA for engine system”, *Reliability Engineering and System Safety*, 75, pp. 17-29.
- ZADEH, L. A. (1978). “Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility”, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 1, n. 1, pp. 3-28.
- ZWINGELSTEIN, G. 1998. *Reliability centered maintenance*, IEEE Tutorial Annual Reliability and Maintainability Symposium.