



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE ALÍVIO DA CONTENÇÃO APLICADOS A REATORES DE PEQUENO PORTE

MARIA ALICE MORATO RIBEIRO

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:
Dr. José Messias de Oliveira Neto

**São Paulo
2001**



ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE ALÍVIO DA CONTENÇÃO APLICADOS A REATORES DE PEQUENO PORTE

MARIA ALICE MORATO RIBEIRO



Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Mestre em Ciências na
Área de Reatores Nucleares de Potência.

Orientador:

Dr. José Messias de Oliveira Neto

São Paulo
2001



ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE ALÍVIO DA CONTENÇÃO APLICADOS A REATORES DE PEQUENO PORTE

MARIA ALICE MORATO RIBEIRO

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Mestre em Ciências na
Área de Reatores Nucleares de Potência.**

Orientador:

Dr. José Messias de Oliveira Neto

**São Paulo
2001**

Para minha filha Carolina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. José Messias de Oliveira Neto pela dedicação ao trabalho.

Agradeço também ao chefe da seção de Análise Probabilística de Segurança e Integração de Sistemas Msc. Arivaldo Vicente Gomes pelo apoio e colaboração. Também agradeço a todos colegas da seção que me apoiaram e colaboraram muito.

SUMÁRIO

	Pag.
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII
 <u>CAPÍTULO 1</u> - INTRODUÇÃO	
1.1-Objetivos do Trabalho	1
1.2-Organização do Trabalho	3
 <u>CAPÍTULO 2</u> - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1-Introdução	4
2.1.1-Histórico	5
2.2-Tipos de Filtros Despressurizadores instalados no Mundo	6
2.2.1-Suécia	6
2.2.2-França	10
2.2.3-Alemanha	11
2.2.3.1- Reator Brokdorf	13
2.2.3.2- Sistema Kraftwerk Union para BWR	13

2.2.3.3- Projeto de Filtro do Kfk	20
2.2.4-Suiça	23
2.2.4.1- Beznau	24
2.2.4.2- Gösgen	26
2.2.5-VVER	30
2.3- Estimativa de Custos	33

CAPÍTULO 3 -ACIDENTES SEVEROS EM REATORES PWR -

3.1-Evolução de um acidente severo	36
3.1.1 – Definição de Termos Fonte	37
3.2-Históricos sobre Acidentes Severos	37
3.3- Etapas de um Acidente Severo	41
3.3.1- Liberação de Atividade do Refrigerante	42
3.3.2 - Liberação de Atividade do “Gap”	42
3.3.3 - Liberação Inicial dentro do Vaso	44
3.3.4- Liberação para fora do Vaso	44
3.3.5 – Liberação final dentro do Vaso	45
3.4-Caracterização dos Termos Fontes para a Contenção	48
3.5-Limitação dos valores de liberações na NUREG-1465 (SOFFER et al., 1995)	51
3.6-Forma Química dos produtos de fissão	52
3.6.1-Iodo	52
3.6.2-Outros produtos de fissão	54
3.7-Comportamento da contenção em acidentes severos	54
3.7.1-Categorias de liberação	54
3.7.1.2- Falha da contenção como resultado de explosões	57

3.7.2-Estratégias de Alívio da Contenção	58
<u>CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DE CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS</u>	
4.1- Termo Fonte	65
4.2- Cálculo de Dose	66
4.2.1.- Cálculo de dose devido à exposição externa imediata	68
4.2.1.1- Dose externa devida à irradiação pelo material da nuvem.	68
4.2.1.2- Dose externa devida à irradiação pelo material depositado no solo	70
4.2.1.3- Dose β externa na pele	71
4.2.2- Cálculo da Dose devido à exposição interna imediata	72
4.2.2.1- Dose interna devida à inalação do material da nuvem	73
4.2.2.2- Dose interna devida à inalação do material ressuspenso	73
4.3- Efeitos imediatos à saúde	76
4.4- Meteorologia	77
4.5- Deposição do material radioativo	81
4.5.1- O modelo de deposição	81
4.5.1- Deposição a seco	81
4.5.2- Deposição úmida	83
4.6- Distribuição Populacional	87
4.7- Medidas de Proteção	89
4.7.1- Ações de Proteção	89

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO DE REATOR DE PEQUENO PORTE

5.1- Características Principais do reator de pequeno porte	94
5.1.1- Inventário do reator de pequeno porte	94
5.2- Caracterização do Termo Fonte	95
5.2.1- Termo Fonte para a contenção	95
5.2.2- Termo Fonte para o ambiente	95
5.3- Características do Local	100
5.3.1- Meteorologia	100
5.3.2- Características Topográficas	100
5.3.2- Distribuição Populacional	103
5.4- Resultados	106
5.4.1- Discussão dos Resultados	108
5.4.1.1- Grupo 1	108
5.4.1.2- Grupo 2	114
5.4.1.3- Grupo 3	118
5.4.1.4- Grupo 4	122

CAPÍTULO 6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1- Conclusões	126
-----------------	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Estimativas de custos de instalação de sistemas de alívio da contenção com filtros.

Tabela 3.1- Seqüências dominantes para acidentes severos em reatores PWR.

Tabela 3.2- Fases de liberação em acidentes severos.

Tabela 3.3- Duração das fases de liberação na contenção, para PWR.

Tabela 3.4- Grupos de Radionuclídeos STCP.

Tabela 3.5- Grupos de Radionuclídeos Revisados.

Tabela 3.6- Frações liberadas na contenção para PWR.

Tabela 4.1- Órgãos alvo e fatores de peso conforme o ICRP .

Tabela 4.2 – Parâmetros para cálculo da função de ressuspensão RESUS.

Tabela 4.3- Efeitos imediatos à saúde

Tabela 4.4 – Coeficientes de dispersão.

Tabela 4.5 – Velocidades de Deposição Típicas (PANITZ, 1989).

Tabela 4.6 – Parâmetros de deposição e ressuspensão utilizados no presente trabalho.

Tabela 4.7 – Coeficientes e expoentes para determinação do coeficiente λ

Tabela 4.8 – Caminhos de exposição, fases do incidente nuclear e ações de proteção.

Tabela 4.9- Níveis de intervenção primários para a Fase Inicial ou de Emergência.

Tabela 4.10- Limites da Concentração de radionuclídeos no solo.

Tabela 5.1- Inventário do núcleo , para 1120 dias de operação e potência média de 30%.

Tabela 5.2 – Termos Fonte para o ambiente para acidentes em Reatores tipo PWR, na Alemanha .

Tabela 5.3 – Eficiência dos Sistema de Filtros com malha de aço utilizados na Alemanha.

Tabela 5.4 – Frações de liberação dos Radionuclídeos nos dois casos: com e sem a atuação do Sistema de Filtros e Alívio.

Tabela 5.5 – Dados de entrada para os Casos Analisados

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.a- Sistema FILTRA em reator BWR de Barseback, Suécia.

Figura 2.1.b- Sistema FILTRA em reator BWR na Suécia.

Figura 2.2 – Projeto Conceitual do Sistema de Filtros e Alívio da Contenção francês.

Figura 2.3 - Fluxograma do Sistema de Alívio e filtros da KWU.

Figura 2.4 - Planta KRBII.

Figura 2.5 – Esquema de evolução da pressão na contenção.

Figura 2.6 – Diagrama do sistema de alívio da contenção da KRB-II.

Figura 2.7 – Sistema de alívio da Contenção com os filtros para Iodetos e particulados localizado do lado externo da contenção .

Figura 2.8- Esquema do Filtro do Sistema de Alívio da Contenção com todos filtros externos à contenção.

Figura 2.9 - Sistema de alívio da Contenção, para filtro de Iodetos externos e filtro para aerossóis interno à contenção.

Figura 2.10- Esquema do Filtro do Sistema de Alívio da Contenção, para filtro de Iodetos externos e filtro para aerossóis interno à contenção.

Figura 2.11– Fluxograma do sistema de filtração e alívio da contenção de Beznau.

Figura 2.12 – Seção do filtro de Beznau.

Figura 2.13 – Diagrama do sistema de Alívio instalado em Gösgen.

Figura 2.14- Diagrama Esquemático do sistema de Filtração e Alívio da Contenção em Bohunice (VVER) V1 NPP.

Figura 2.15 – Unidade “Scrubber” com bicos tipo venturi Siemens instalada em Bohunice.

Figura 2.16- Sistema de Filtração e alívio da contenção instalado em NPP.

Figura 4.1- Principais Etapas da Avaliação das Conseqüências Radiológicas

Figura 4.2 – Esquema dos caminhos de exposição considerados no modelo dosimétrico e de efeitos à saúde.

Figura 4.3 - Exemplo de uma Grade de Distribuição Populacional, com 16 Setores angulares e 8 Bandas:

Figura 5.1- Distribuição populacional para um raio de até 10km de distância a partir do sítio

Figura 5.2- Distribuição populacional para um raio de 10km até 80km de distância a partir do sítio.

Figura 5.3 – Concentração média de I-131 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)

Figura 5.4 – Ccdf para concentração média de I-131 no solo $> 3\text{E}+8\text{Bq/m}^2$ vs Área (km^2)

Figura 5.5 – Concentração média de Cs-137 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)

Figura 5.6 – Concentração média de Cs-134 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)

Figura 5.7 - Dose Efetiva Média (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.8 - Gráfico Ccdf, para Dose Efetiva Média $> 5 \text{ mSv}$ vs Área (km^2)

Figura 5.9 - Concentração de I-131 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)

Figura 5.10 - Ccdf para Conc I-131 no solo $> 3 \text{ E}+8 \text{ Bq/m}^2$ vs Área (km^2)

Figura 5.11 - Dose Efetiva Média (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.12 - Dose Efetiva Média devida apenas à nuvem (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.13 - Dose efetiva média devida apenas aos gases nobres presentes na nuvem (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.14 - Ccdf para Dose Efetiva Média $> 5 \text{ mSv}$ vs Área (km^2)

Figura 5.15 - Concentração de Iodo 131 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)

Figura 5.16 - Ccdf para I-131 $> 3 \text{ E}+8 \text{ Bq/m}^2$ vs Área (km^2)

Figura 5.17 - Concentração média de Cs-137 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)

Figura 5.18 - Dose Efetiva Média (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.19 - Dose na Tireóide (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.20 - Gráfico de Dose Efetiva Média (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.21 - Gráfico de Dose Média na Tireóide (Sv) vs Distância (km)

Figura 5.22 - Gráfico de Ccdf para Dose Efetiva > 5 mSv vs Área (km²)

Figura 5.23 - Gráfico Ccdf para dose efetiva > 50mSv vs Área (km²)

Figura 5.24 - Gráfico de Ccdf para Dose na Tireóide > 50mSv vs Área (km²)

LISTA DE ABREVIATURAS

ACE – Aerosol Characterisation Experiment

A_{GR0} – Concentração inicial de material depositado no solo

A_{SK} – Concentração inicial de material depositado na roupa e pele

AA – Concentração de material no ar integrado no tempo

B_R – Taxa de respiração

C_{AR} – Concentração de radionuclídeos no ar próximo ao solo

CEA – Comissão de Energia Atômica na França

DBA - Acidentes Básicos de Projeto

D – Dose recebida

D_{50} – Dose que causa um determinado efeito em 50% da população exposta

D_{CL} – Dose externa devido à passagem da nuvem

D_{IH} – Dose interna devido à inalação do material da nuvem

D_{IHR} – Dose interna devido à inalação do material ressuspenso da nuvem

D_{SK} – Dose externa devido à irradiação pela pele e roupas

F_{CL} – Fator de conversão de Dose para a nuvem

F_{GR} – Fator de conversão de Dose para o material depositado no solo

F_{IH} – Fator de conversão de Dose para inalação do material da nuvem

F_{IHR} – Fator de conversão de Dose para inalação do material ressuspenso

F_{SK} – Fator de conversão de Dose para contaminação da pele e roupas

f_w – fração de radionuclídeos que permanece na nuvem

FCVS – Sistema de Alívio para a Contenção com Filtros (Filtered Containment Venting System)

FZK -Forschungszentrum Karlsruhe

g_P – população no setor da grade

I – taxa de precipitação pluviométrica

IPSN – Institute du Protection Surete Nuclearie

KWU - Kraftwerk Union

H – função perigo

H – Altura da Chaminé

HSK – Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

k – índice que designa um radionuclídeo específico

NF – Número de fases de liberação

NRC – Nuclear Reactor Commission

NRPB –National Radiological Protection Board Advice

o – índice que designa um órgão específico

PDF- Princípio da Defesa em Profundidade

PID – Período de Integração de Dose

p_x, p_y, q_y, q_z – coeficientes de difusão

Q – Quantidade de material liberada pela fonte

R – Risco de um indivíduo ser afetado pela radiação

R_{TOTAL} – Risco total

RESUS – Função que retrata a ressuspensão de material depositado no solo

RSS – Relatório de Segurança WASH-1400

S – parâmetro de forma

SAF – Sistemas de Alívio e Filtração da Contenção

SF_{GR} – Fator de blindagem devido ao material depositado no solo, em condições de atividades normais ou externas

SF_{IHR} – Fator de blindagem para inalação do material ressuspenso, em condições de atividades normais ou externas

SF_{IH} – Fator de blindagem para inalação do material da nuvem, em condições de atividades normais ou externas

SF_{SK} – Fator de blindagem devido ao material depositado na pele e roupas, em condições de atividades normais ou externas

SKI - Swedish Nuclear Power Inspection

STCP – “Source Term Code Package”

T_i – Tempo antes do início da liberação

T_{SKIN} – Tempo de descontaminação da pele após a passagem da nuvem

T_B – Meia vida biológica da pele

T_P – Meia vida física do radionuclídeo

TMI-2 - Three Mile Island-2

u_T – velocidade do vento durante o intervalo de tempo T

$U(t)$ – integral de tempo conforme equação 4.5.

v_D – velocidade de deposição seca

α - Sequência de falha com ruptura da contenção devido à explosão dentro do vaso do reator ;

β - Sequência com falha da contenção resultante da operação inadequada das penetrações nas aberturas do edifício da contenção;

χ_T – Concentração de atividade no ar integrada no tempo

χ_D – Concentração de atividade no solo devido a deposição seca

χ_W – Concentração de atividade no solo devido a deposição úmida

δ - Sequência com falha da contenção devido a sobrepressão de Hidrogênio;

ϵ - Sequência com falha da contenção, com o núcleo fundido liberado para fora do vaso do reator.

γ - Sequência com falha da contenção devido a queima de Hidrogênio;

λ - Coeficiente de remoção úmida

λ_k – Constante de decaimento radioativo

λ_1, λ_2 – Constantes meteorológicas utilizadas no cálculo da função RESUS

λ_r – Constante de ressuspensão

σ_z – desvio padrão vertical

σ_x – desvio padrão horizontal

ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE ALÍVIO DA CONTENÇÃO APLICADOS A REATORES DE PEQUENO PORTE

Maria Alice Morato Ribeiro

RESUMO

Este trabalho identifica as principais características funcionais e requisitos do Sistema de Alívio e Filtração da Contenção (SAF), apresentando um levantamento das características dos sistemas existentes. Outro aspecto considerado é a redução das doses de radiação pelo SAF, que fornece subsídios importantes na definição dos níveis de intervenção para proteção dos indivíduos do público em caso de acidente nuclear.

Utilizando o código PC-COSYMA, é efetuada uma análise de consequências para o caso de um reator de pequeno porte, localizado em área rural. Várias condições de liberação são analisadas com e sem o SAF.

A STUDY ABOUT FILTERED CONTAINMENT VENTING SYSTEMS APPLIED TO A SMALL SIZE PWR REACTOR

Maria Alice Morato Ribeiro

ABSTRACT

This work identifies the Containment Venting and Filtering System characteristics and functional requirements. Also shows a survey of the installed systems characteristics in all world. The reduction of radiation dose and the minimization of the Intervention Level for Public Protection in a nuclear reactor accident are demonstrated.

With PC-COSYMA code application is realized the accident consequence analysis for a case of small size reactor, located at agricultural area. Several conditions of a radiation source are considered with and without the Filtered Containment Venting System.

Capítulo 1-INTRODUÇÃO

1.1-Objetivos do trabalho

O principal objetivo da segurança nuclear é proteger indivíduos, trabalhadores, sociedade e meio ambiente contra os perigos radiológicos potenciais de uma instalação nuclear. Para atingir esse objetivo as instalações nucleares são projetadas de acordo com o Princípio da Defesa em Profundidade (PDF).

O Princípio da Defesa em Profundidade tem como base a incorporação de várias barreiras contra a liberação não controlada de material radioativo, requisitos de prevenção, mitigação e gerenciamento de acidentes. A prevenção tem por objetivo evitar a ocorrência de desvios operacionais, o que pode ser atingido por um projeto robusto e conservativo. O PDF assume entretanto que apenas a prevenção não é suficiente para garantir a segurança, podendo ocorrer desvios que violam as condições normais de operação. Para estas situações devem ser previstos sistemas de detecção e controle projetados para interromper a evolução de eventos indesejáveis. O PDF assume também que, embora pouco provável, a evolução de alguns desvios podem não ser corrigidas a tempo, sendo necessários sistemas de engenharia adicionais para mitigar as consequências resultantes dessas condições acidentais(AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA,1986b).

Dos sistemas previstos para controlar as condições acidentais, a contenção nuclear é a última barreira física projetada para impedir a liberação não controlada de material radioativo para o meio ambiente, devendo manter-se funcional para todo o espectro de acidentes básicos de projeto postulados para o reator (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA, 1988).

Estudos sobre seqüências de acidentes severos indicam que, em determinadas condições, embora com baixíssima probabilidade, a funcionalidade da contenção pode vir a ser comprometida por pressões internas muito acima da pressão de projeto, levando a uma falha estrutural da mesma, para alguns cenários acidentais severos. Situações como aquecimento direto da contenção, explosão de vapor e detonação de hidrogênio, têm condições de gerar energia suficiente para colocar em risco a integridade da contenção (BALLARD, 1988).

A incorporação de um sistema de alívio de pressão pode impedir a perda da integridade estrutural da contenção. Esse sistema, de características passivas, atuaria em condições extremas não só aliviando os gases, mas também filtrando os aerossóis e o lodo gerados, liberando-os para a atmosfera de forma controlada de modo a minimizar as conseqüências radiológicas do acidente (BALLARD, 1988).

A presente dissertação tem por objetivo analisar sistemas de alívio e filtração (SAF), para contenções nucleares de reatores tipo PWR. Propõe-se uma avaliação das soluções encontradas para reatores de potência em países tais como França, Alemanha, Suécia, etc. Apresentam-se os principais requisitos de um SAF para atuar em contenções de pequeno porte e são identificadas as principais características funcionais e requisitos do sistema tais como capacidade de alívio de pressão por períodos prolongados, eficiência na retenção de aerossóis e lodo, prevenção de combustão de Hidrogênio, etc. Outro aspecto considerado é a redução das doses de radiação pelo SAF, o que fornece

subsídios importantes na definição dos níveis de intervenção para a proteção de indivíduos do público em caso de um acidente nuclear (AGÊNCIA INTERNATIONAL DE ENERGIA ATÔMICA, 1985 e 1986c).

1.2-Organização do trabalho

O Capítulo 2 apresenta um levantamento bibliográfico, efetuado até o ano 2000, sobre os sistemas de alívio da contenção.

O Capítulo 3 apresenta um levantamento sobre cenários de acidentes severos, para reatores PWR, incluindo características das etapas de liberação, bem como composição e forma química dos produtos de fissão. Também é apresentada uma comparação dos termos fontes, para Reatores tipo PWR, utilizados em diversos países.

O Capítulo 4 apresenta a modelagem de conseqüências radiológicas, reunindo as informações obtidas para o presente estudo e as etapas utilizadas nos cálculos de conseqüências. Utilizou-se como ferramenta para análise de conseqüências o código PC-COSYMA.

No Capítulo 5 estão apresentados os dados relativos ao caso de um reator tipo PWR de pequeno porte, sujeito a acidente severo. Nesta etapa aplicaram-se os conhecimentos obtidos nas fases anteriores do estudo. Os cálculos apresentados referem-se ao reator utilizando um sistema SAF e também sem o referido sistema.

O Capítulo 6 fornece as conclusões e recomendações resultantes do desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1-Introdução

As plantas nucleares são projetadas para serem seguras, para uma vasta gama de acidentes, incluindo os de ruptura da tubulação principal, do sistema de refrigeração do reator. Esses acidentes são denominados acidentes básicos de projeto (DBAs).

Além dos DBAs, existem os acidentes severos, que ocorrem em caso de falha das barreiras de contenção dos produtos de fissão e dos sistemas de segurança. No acidente severo não se consegue manter a geometria do núcleo do reator, implicando em falha na remoção de calor de decaimento do mesmo. O acidente severo é um evento de baixa probabilidade de ocorrência.

A avaliação de acidentes severos passou a ser mais importante porque muitos dos cenários acidentais desse tipo podem potencializar uma sobrepressão e possível falha da contenção. A adição de um sistema de alívio com filtro para remover produtos de fissão particulados tem sido proposta como um meio de mitigar os efeitos de uma falha estrutural da contenção, fornecendo um patamar de liberação controlada para o meio ambiente.

No artigo (SCHLUETER & SCHMITZ, 1990), foi apresentada uma revisão dos projetos de filtros que estão sendo ou já foram implementados, os critérios de projeto

propostos para estes sistemas, os critérios para manutenção e operação e os seus custos.

2.1.1- Histórico

A Análise de Segurança efetuada no estudo RSS (WASH-1400) (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), antes do acidente de TMI-2 (Three Mile Island-2), mostrava que o grande risco era devido a acidentes , maiores que o DBA, em que ocorria a liberação e dispersão radioativa. A análise apresentada por CYBULKIS et al.(1978), mostrava que para cenários de fusão do núcleo, as falhas de sobrepressão da contenção devido ao vapor e gases não condensáveis são as principais contribuintes para o risco das plantas nucleares. Agindo-se simultaneamente contra a sobrepressão da contenção e removendo os aerossóis, pode-se reduzir o risco contra estas seqüências de acidentes.

Após o acidente de TMI-2, ocorrido em 1978, foram conduzidas investigações sobre filtros e despressurizadores de contenções nucleares. No plano de ação de TMI-2 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1980) da NRC, foi proposto que:

“Os requisitos de segurança deverão considerar o uso de sistemas de contenção com filtros e sistemas de alívio, para mitigar as conseqüências de acidentes com degradação do núcleo e fusão do mesmo.”

Nos Estados Unidos a indústria nuclear e a NRC produziram vários trabalhos relacionados a sistemas de filtros da contenção. O Sandia National Laboratory (SANDIA LABORATORIES, 1979) avaliou a eficiência de um filtro de areia e cascalho na remoção de aerossóis para a operação de um sistema de contenção com filtro/despressurizador durante um acidente severo. O “Industry Degrades Core Rulemaking Program” (IDCOR) (SANDIA LABORATORIES, 1979) avaliou alternativas conceituais para contenção que incluem um sistema de filtro/despressurizador para contenção. A NRC já discutia sobre o

sistema de alívio da contenção no NUREG-1150 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990).

Os países europeus também desenvolveram o conceito de filtro de alívio, para os seus reatores nucleares de potência. A Suécia desenvolveu um sistema de filtro de alívio denominado FILTRA; a Alemanha projeta e vende estes sistemas através da Siemens e a França optou por um sistema de alívio com um tipo de filtro de areia. (DELALANDE,1987).

2.2- Tipos de filtros despressurizadores instalados no mundo

São apresentadas a seguir descrições resumidas dos diversos sistemas de filtros despressurizadores projetados na Suécia, França, Alemanha, Suíça e Leste Europeu. Na revisão destes sistemas deve-se notar que se considerou uma grande variedade dos parâmetros usados, incluindo a sua capacidade final.

2.2.1-Suécia

Seguindo a orientação do RSS, no WASH-1400 (U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975) e sua recomendação para aumentar as salvaguardas de engenharia referentes à mitigação de acidentes severos, a Swedish Nuclear Power Inspection (SKI) desenvolveu o FILTRA (um sistema de filtros e despressurizadores atmosféricos para contenção do LWR).

O desenvolvimento do sistema FILTRA (PERSHAGEN & NEKSON, 1984) mostrou que:

- (1) É possível prever a falha da contenção devido a seqüências que levam a eventos de sobrepressão na ausência de despressurização, incluindo transientes e quebras de tubulação que levam a perda de remoção de calor residual.

- (2) A filtração dos gases despressurizados reduz as consequências ambientais consideravelmente, para alguns cenários acidentais severos. Estes eventos incluem quebras de tubulação em conjunto com falhas do sistema de refrigeração de emergência e/ou inadequação do sistema de remoção de calor.
- (3) Um bom efeito de filtração é obtido com um leito de "sprays". Em um volume de 1000m^3 (35300ft^3) ocorre a condensação completa de todo vapor produzido até 24h após o acidente máximo no reator do tipo do instalado em Barseback (BWR 580Mwe, contenção Mark II, 2 unidades). As partículas de aerossóis e iodeto elementar, podem ser retidas com eficiência maior que 99.9%.

Como condição para construção de duas unidades em Barseback foi exigido que se construísse um sistema de filtração para as contenções das mesmas. A proximidade de Barseback a Copenhagen,; na Dinamarca; e Malmon, na Suécia, teve uma grande importância na decisão.

O filtro sueco (PERSSON,1985) consiste em um vaso cilíndrico de concreto reforçado, revestido com aço carbono e construído ao nível do solo. A Fig.2.1 mostra um arranjo conceitual do FILTRA. O vaso e o sistema filtro/despressurizador são resistentes a um terremoto de 0.15g. As dimensões principais do vaso são:

Volume: da ordem de 10.000m^3

Diâmetro: 20m

Altura: 40m

Espessura da parede: 1m

O vaso do FILTRA é preenchido com Nitrogênio para prevenir queima de Hidrogênio e o crescimento orgânico nos cascalhos (rocha moída de diâmetro entre 25 e 35mm). Os cascalhos também ficam contido no interior deste vaso. Aproximadamente 15.000.000 kg de cascalho são necessários para encher o vaso.

Os vapores e gases são distribuídos na camada superior do leito de cascalho, o vapor condensa na superfície das pedras, inicialmente fria e os gases escoam junto com o condensado. O leito de cascalho pode acomodar aproximadamente 700m³ de condensado.

O sistema inclui uma tubulação de despressurização de diâmetro 600mm para cada uma das duas contenções. A capacidade de cada linha de despressurização é de 100kg/s de vapor (ou gás e vapor). A tubulação de despressurização está conectada a uma via molhada preenchida com ar, no fim da qual existe um disco de ruptura, com uma válvula de isolamento, travada na posição aberta. Durante a operação normal as contenções do reator são isoladas do FILTRA somente por discos de ruptura. Os discos de ruptura são projetados para uma pressão de ruptura de 0.65Mpa, que corresponde à pressão de projeto da contenção.

A parte seca está também conectada às linhas de alívio com tubulação de diâmetro 150mm cada uma, com duas pequenas válvulas fechadas em série. Isto permite a pressurização da contenção antes da pressão alcançar o valor de ruptura. Cada linha de alívio está equipada com um sistema de drenagem em ponto baixo, capaz de coletar qualquer condensado drenado durante as primeiras 24h seguintes à ativação do FILTRA. O condensado, nos tanques de drenagem, pode ser enviado para o poço ("sump") no fundo do vaso do filtro. No caso de acidente severo o FILTRA é acionado pela falha do disco de ruptura e continua a operar passivamente por 24h.

O sistema FILTRA foi projetado de modo a reter, na contenção, 99,9% do inventário radioativo do núcleo, excluindo os gases inertes.

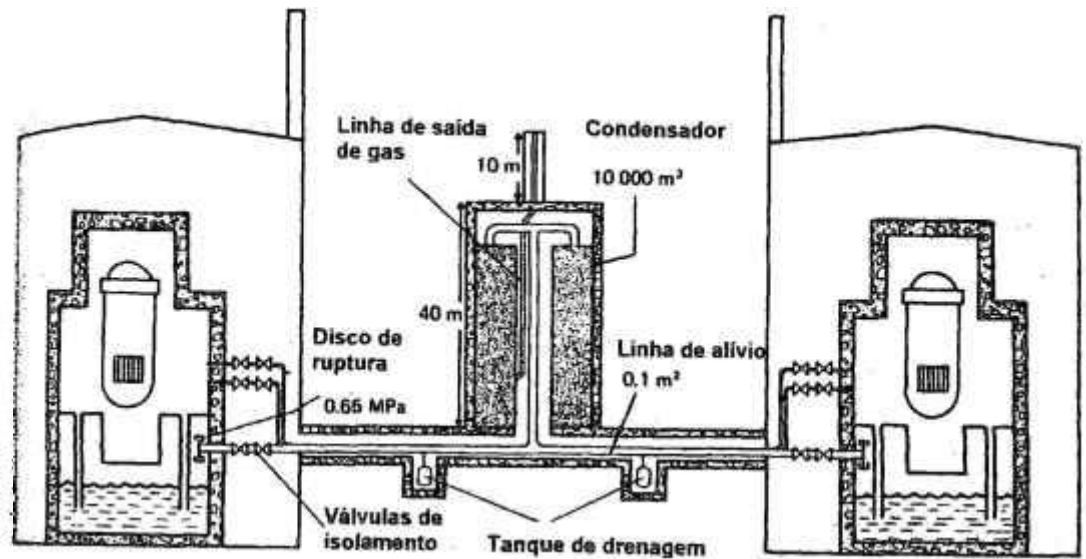


Figura 2.1.a- Sistema FILTRA no reator BWR de Barseback, Suécia, (PERSSON, 1985).

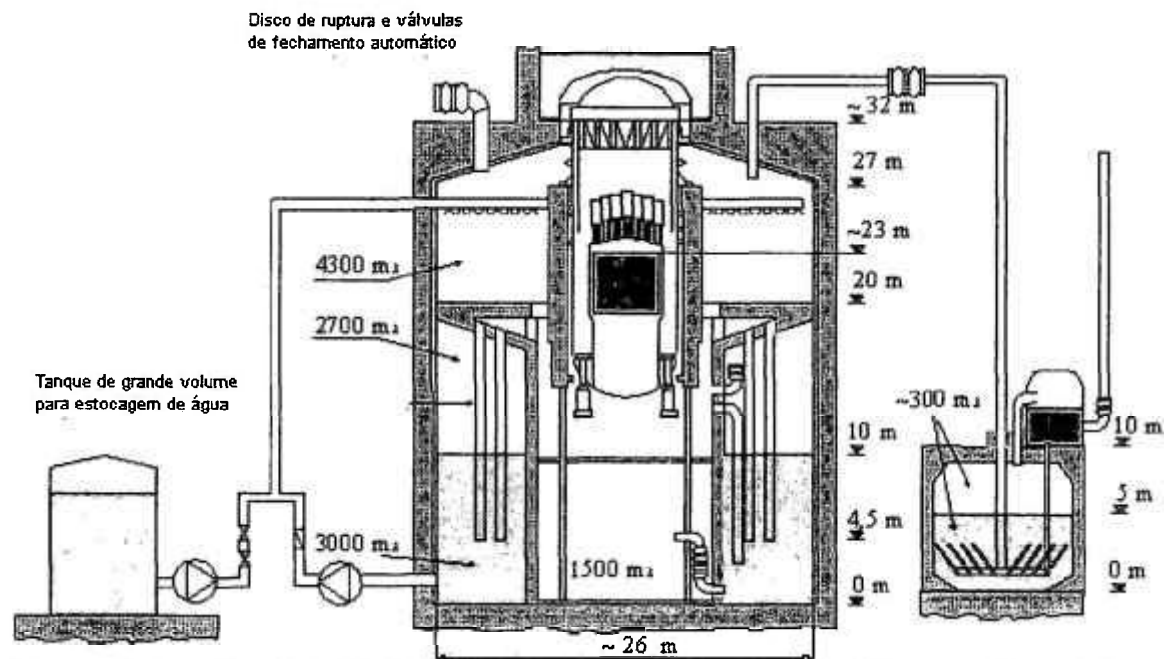


Figura 2.1.b- Sistema FILTRA em reator BWR na Suécia, (ROLANDSON et al., 1997).

2.2.2- França

O estudo francês Piteas (DELALANDE, 1987) conduzido pelo Institute du Protection Surête Nucleaire (IPSN) da Comissão de Energia Atômica (CEA), mostrou que, com a utilização de filtros de areia é possível obter um fator de redução de 10 na concentração de radionuclídeos no meio ambiente.

Para conseguir essa redução, o sistema de filtro despressurizador deve satisfazer os seguintes requisitos:

- Não interferir com a operação normal ;
- Ser independente de outros sistemas de ventilação;
- Ser capaz de ser acionado tanto manual quanto remotamente, sem quaisquer riscos de danos de radiação sérios para os operadores; e
- Ser compatível com descompressões que podem ocorrer devido a testes de vazamento (periódicos) da contenção. Isto permite também testes periódicos na disponibilidade do sistema.

O FCVS (Filtered Containment Venting System) francês necessita de energia elétrica disponível até um dia (24h) após o acidente (devido à necessidade de monitoração e controle das funções).

O cenário acidental para o qual o FCVS é dimensionado assume falha completa dos sistemas de segurança e aumento da pressão da contenção devido à geração de gases através da decomposição do concreto por fusão. A densidade dos vapores na contenção é considerada como de 4kg/m^3 , com um teor de atividade consistente com a do WASH-1400 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975).

As características do fluido a ser filtrado são assumidas como as que seguem:

- Fluxo mássico de gás: 3.5 kg/s

- Composição mássica:

Ar: 33%	CO ₂ : 33%	Vapor: 29%
CO: 5%	Temperatura: 140°C	Pressão: 5 bar abs.
- Teor de aerossóis:	0.1g/ m ³ .	

A velocidade no leito do filtro é projetada para um fluxo máximo de entrada de 10cm/s e a perda de carga através do filtro é de aproximadamente 100mbar.

Um esquema do filtro é mostrado na Fig.2.2 (SCHLUETER & SCHMITZ, 1990). O filtro consiste em um tanque de aço carbono com uma pressão de projeto de 1.3bar e uma espessura de parede de 7.32mm. O leito do filtro possui espessura de 80cm, sendo composto de areia proveniente de um depósito próximo a Cattenom (diâmetro de grão de 0.6mm). O filtro e a tubulação associada não são considerados como itens de segurança, exceto as válvulas manuais de penetração na contenção, as quais são operadas manualmente.

A EdF instalou sistemas de alívio e filtros de areia em todos seus reatores PWR.

2.2.3-Alemanha

De acordo com estudos de risco efetuados por VARLEY (1987), nas plantas de geração elétrica nucleares da Alemanha, as consequências de acidentes severos tem sido superestimadas em aproximadamente 1 ou 2 ordens de grandeza. Esses estudos indicam também que, qualquer avaria na integridade da contenção, levaria de 4 a 5 dias antes que pudesse ocorrer falha do revestimento interno da contenção, para um reator tipo PWR de 1300MWt (sem considerar a ocorrência de explosões internas).

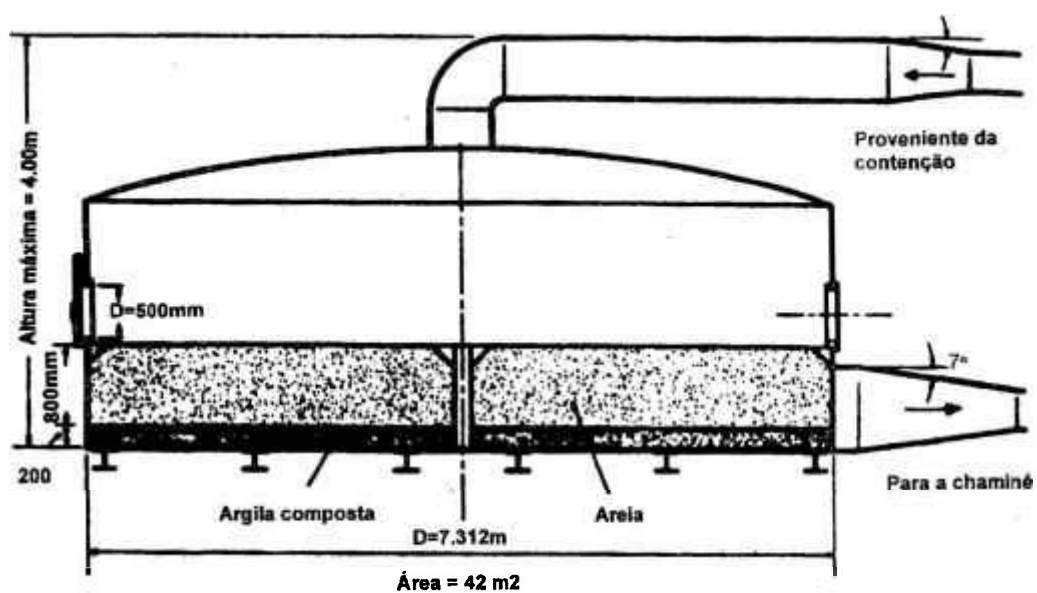


Figura 2.2 – Projeto Conceitual do Sistema de Filtros e Alívio da Contenção francês(SCHLUETER & SCHMITZ, 1990).

Devido ao intervalo de tempo relativamente longo antes da falha da contenção, tem-se um maior intervalo de tempo para implementar medidas que evitem uma falha de sobrepressão tais como acionamento de um sistema de alívio.

A Alemanha desenvolveu diferentes projetos de FCVS, os quais são discutidos a seguir.

2.2.3.1-Reator Brokdorf (PWR)

O sistema do FCVS para o reator PWR Brokdorf utiliza penetrações já existentes na contenção, com válvulas de isolamento apropriadas. Três estágios de filtro são utilizados:

Primeiro estágio: pré-filtragem: 90% (1-10 μ m)

Segundo estágio: filtro de aço inox 99-99.9% (0.2 μ m)

Terceiro estágio: filtro 99-99.9%

Para este tipo de filtro foi desenvolvida uma fibra de aço inox (2 μ m) , (DILLMAN & PASLER, 1984), com maior capacidade de carga, em termos de temperatura (maior que 500°C), umidade, exposição à radiação, etc.

2.2.3.2-Sistema de Kraftwerk Union para BWR

A Harburgisch Electricitate-Werke AG (HEW) possui um sistema de contenção com filtro despressurizador da Kraftwerk Union (KWU), para instalação em Brunsbuttel e nas plantas BWR Krummel.

O sistema da KWU é projetado para permitir um alívio de pressão da contenção a partir de um poço de supressão, através de duas válvulas de isolamento da contenção

para um vaso de pressão externo (CZECH, 1989). O vaso de pressão consiste em um sistema de "scrubber" molhado, com bicos de Venturi e filtros para aerossóis particulados secos. A descarga do vaso de pressão passa através de uma válvula de controle de pressão e então para a chaminé. Um esquema deste sistema está mostrado na FIG. 2.3, (SCHLUETER & SCHMITZ, 1990).

O sistema Venturi está submerso, dentro do vaso, em uma solução de pH alto, para absorver qualquer lodo elementar no fluxo proveniente da contenção. Os "scrubbers" tipo Venturi são conhecidos por serem extremamente eficientes nas aplicações convencionais para separação de aerossóis e particulados. O filtro de particulado seco é constituído de peneiras com fios de aço desenvolvidos e testados no centro de pesquisa nuclear de Karlsruhe. A KWU garante o fator de eficiência do filtro como 99% para aerossóis e 90% para o lodo. (SCHLUETER & SCHMITZ, 1990).

A planta KRBII, mostrada na FIG. 2.4, é a mais nova planta BWR da Alemanha. O fornecedor da unidade foi a Kraftwerk Union AG, posteriormente Siemens AG, Power Generation Group (KWU). A operação comercial da unidade B iniciou-se em 1984 e a unidade C em 1985. Comparando com as unidades BWRs mais antigas, a KRBII não é somente uma unidade nova, mas seu projeto tem características muito diferentes das anteriores (REIM & HURLEBAUS, 1995).

As duas unidades foram projetadas de forma integrada, com alguns equipamentos/sistemas comuns a ambas. Embora tenha sido projetada com requisitos adicionais de segurança, foi necessário atender aos requisitos de proteção contra sobrepressão da contenção, no caso de acidentes severos. As medidas adotadas foram:

- Sistema de contenção com alívio e monitoramento da emissão, projetado para limitar o aumento de pressão dentro da contenção resultante da geração de vapor e de gases não condensáveis, filtrando e monitorando a liberação da atmosfera da contenção.

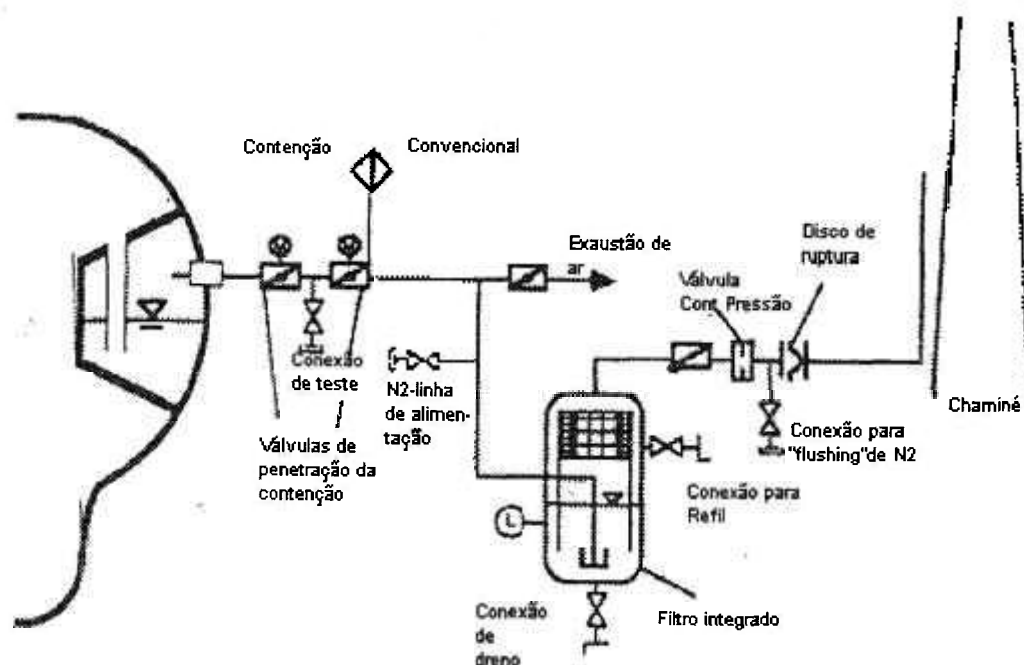


Figura 2.3 - Fluxograma do Sistema de Alívio e filtros da KWU (SCHLUETER & SCHMITZ, 1990)

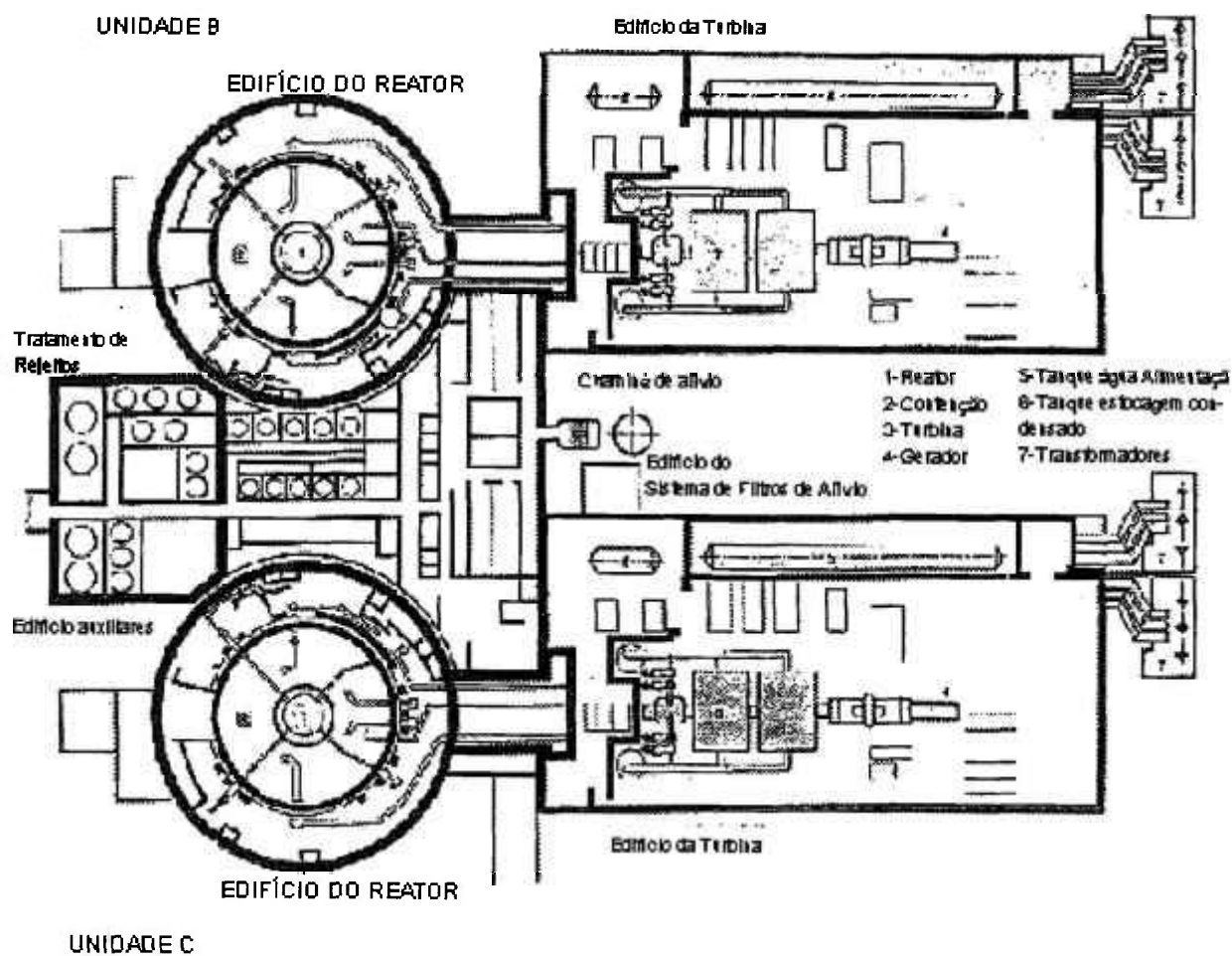


Figura 2.4 (REIM & HURLEBAUS, 1995) - Planta KRBII

- Medidas de mitigação de H_2 , para limitar as cargas de pressão e temperatura dentro da contenção, resultante da reação de H_2-O_2 .

O sistema de alívio da contenção com Venturi foi desenvolvido pela Siemens/KWU. Este sistema foi adaptado para as condições específicas da planta KRBII. Na FIG. 2.5 estão os dados de projeto e os objetivos do sistema da KRB.

O sistema foi projetado para limitar a pressão na contenção a, no máximo, 7 bar (abs). Isto significa que existe uma folga grande com relação à pressão de falha da contenção devido a aumento de pressão, a qual ocorrerá em aproximadamente 11 bar (abs.). A pressão de teste na contenção é de 4.6 bar (abs.).

O fluxo mássico de projeto é de 13.9 kg/s de vapor saturado, a 7 bar (abs.), também assegura uma remoção de calor da contenção equivalente a aproximadamente 1% do calor de decaimento do reator KRBII. Outros dados de projeto do sistema são:

- eficiência de retenção para aerossóis maior ou igual a 99.5%;
- capacidade de carga do filtro maior ou igual a 30kg de aerossóis;
- remoção de calor passivo do vaso do filtro maior que 200kW; e
- menor tempo possível de alívio (menor ou igual a 4h).

O sistema usa uma unidade de filtro comum para ambas as unidades B e C da KRBII. Na Fig. 2.6 está mostrado o esquema de funcionamento (REIM & HURLEBAUS, 1995).

No artigo de ECKARDT et al.(1997b) está apresentada uma lista das plantas alemãs que possuem Venturi com “scrubbers” da Siemens e a data de sua instalação:

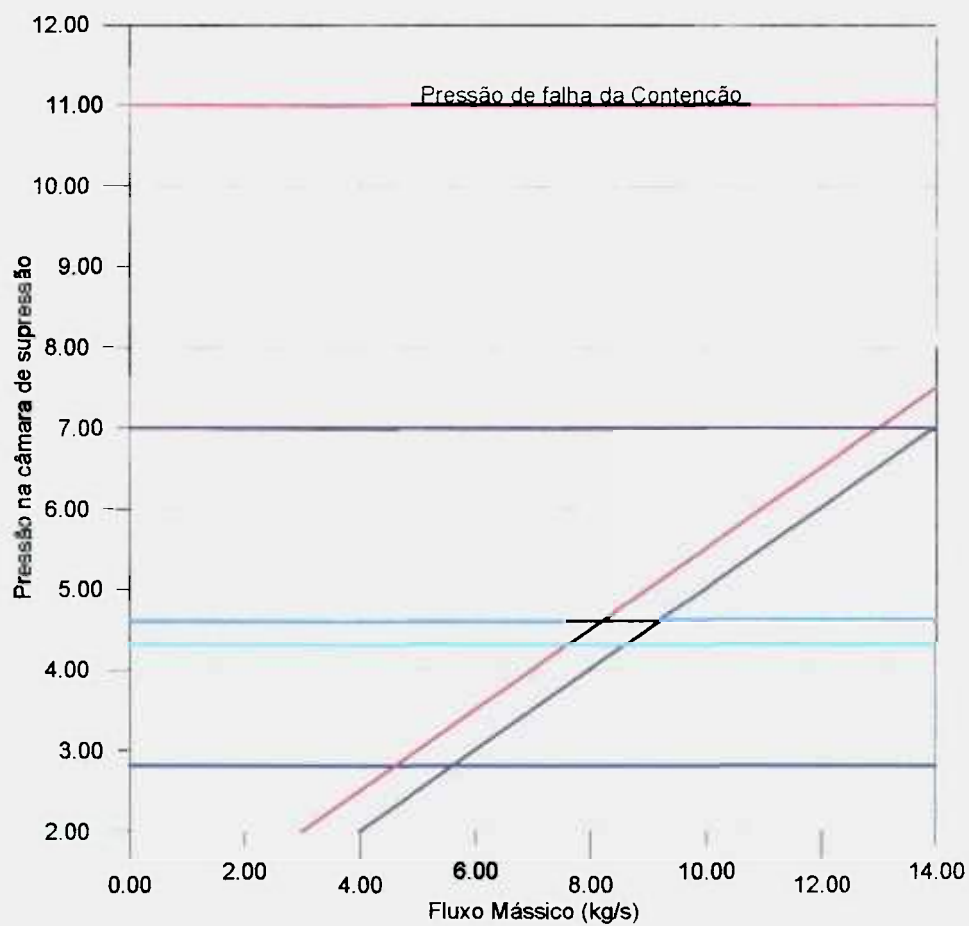
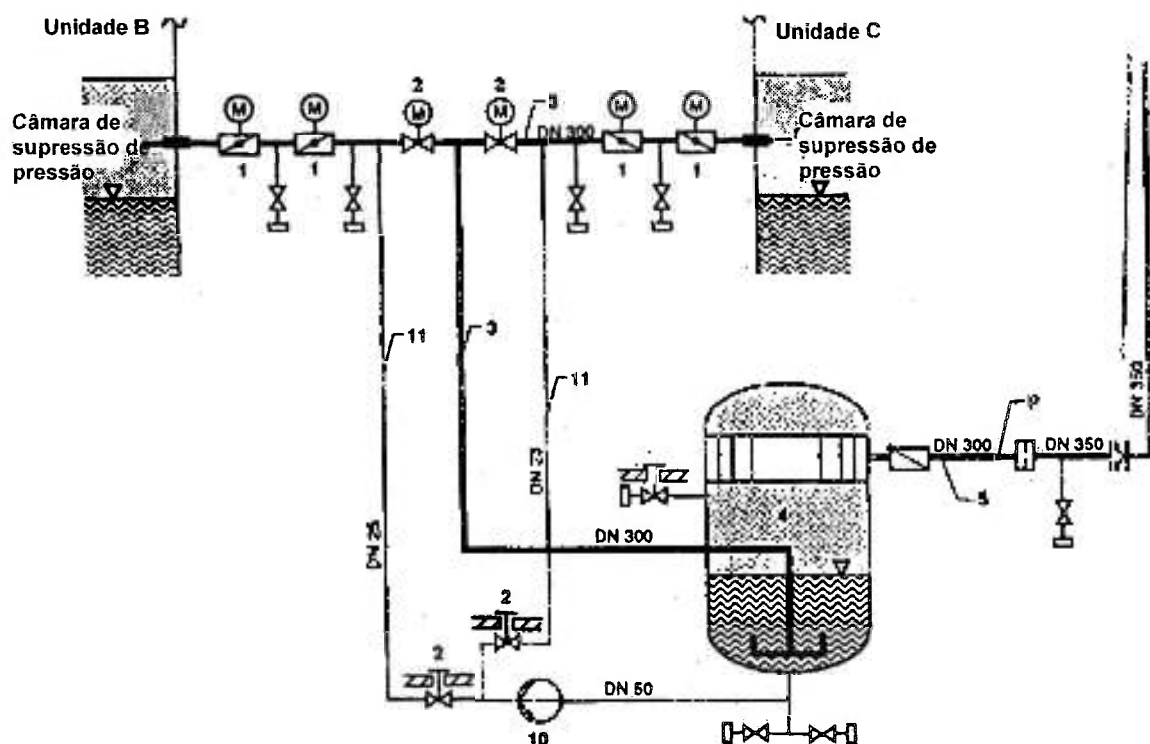


Figura 2.5 - Dados de projeto do Sistema de Alívio da Contenção (REIM, 1995)

- Pressão de desligamento (2.8 bar)
- Pressão da mistura de gás
- Pressão de vapor saturado
- Pressão de Teste (4,6)
- Pressão de Projeto (4.3)
- Pressão de abertura (7 bar)
- Pressão de falha da contenção (11 bar)



- | | |
|--|------------------------|
| 1- Válvulas de isolamento da contenção | 6- Válvula de retenção |
| 2- Válvulas de isolamento da unidade | 7- Placa de Orifício |
| 3- Linhas de gas não filtrado | 8- Disco de ruptura |
| 4- "Scrubber" tipo Venturi | 9- Bomba de retorno |
| 5- Linhas de gas filtrado | 10- Linhas de dreno |

Figura 2.6 – Diagrama do sistema de alívio da contenção da KRB-II(REIM & HURLEBAUS, 1995).

Reator	Data da Instalação	Reator	Data da Instalação
NPP Krümmel	1987	NPP Brunsbüttel	1988
NPP Philippsburg 1, 2	1988	NPP Würgassen	1989
NPP Gundremmingen	1990	NPP Obrigheim	1991
NPP Isar 1	1988	NPP Emsland	1991
NPP Neckar 2	1990	NPP Grafenrheinfeld	1992
NPP Isar 2	1991	NPP Neckar 1	1992

2.2.3.3—Projeto do sistema de Filtros da KFK

Na década de 80/90, a KFK desenvolveu Sistemas de Filtração para a Contenção, conforme relatado em DILLMANN & BUNZ(1991). Foram desenvolvidos dois projetos distintos:

i. Em algumas unidades, utilizam-se filtros de aço inox e filtros para lodetos localizados após a válvula de expansão do sistema de alívio da contenção. O filtro em malha de aço inox tem uma superfície de aproximadamente 20m², podendo consistir em dois estágios. Este projeto é mostrado na Fig. 2.7. O filtro composto de fibras de aço inox possui eficiência maior ou igual à dos filtros HEPA. Um esquema do filtro está na Fig. 2.8.

ii. Em outras unidades, utiliza-se um filtro em fibra de aço inox e outro filtro para lodetos separadamente. Neste caso o filtro de fibras de aço inox opera sob pressão dentro da contenção, conforme mostrado na Fig. 2.9. Isto permite que o projeto do filtro seja modular e compacto, além do que os produtos de fissão permanecerão dentro da contenção. Para atender à carga requerida, o módulo de fibras de aço inox consiste em três estágios. Um esquema do filtro está na Fig. 2.10.

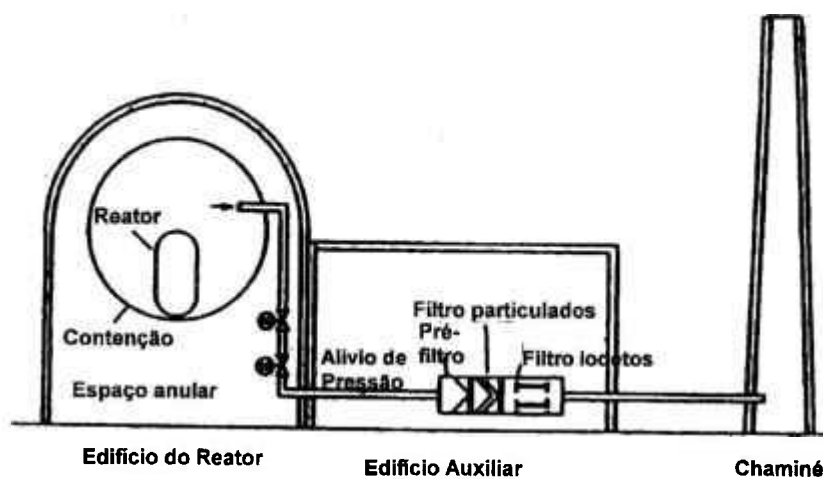


Figura 2.7 – Sistema de alívio da Contenção com os filtros para particulados e iodetos colocados do lado externo da contenção , (DILLMANN & BUNZ, 1991).

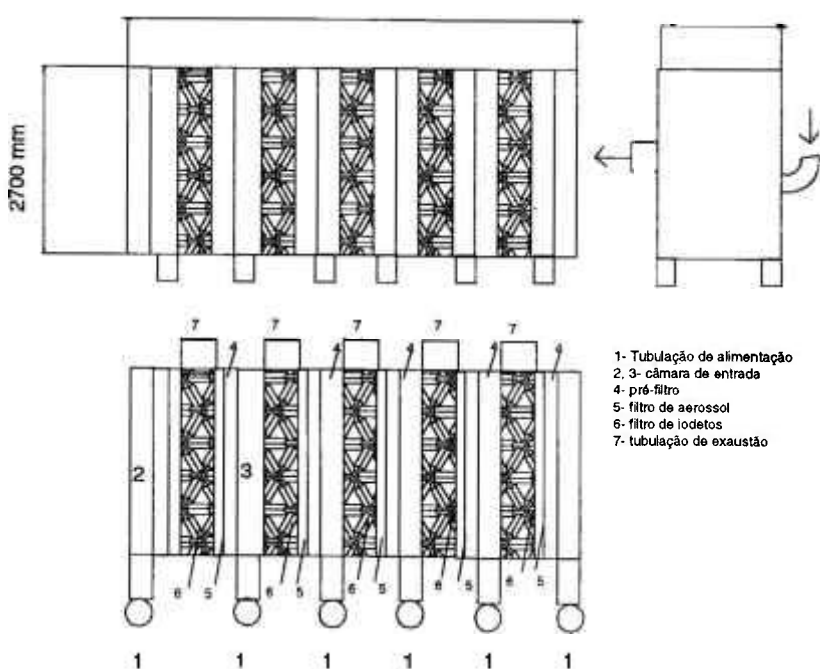


Figura 2.8- Esquema do Filtro do Sistema de Alívio da Contenção para filtro externo à contenção, (DILLMANN & BUNZ, 1991).

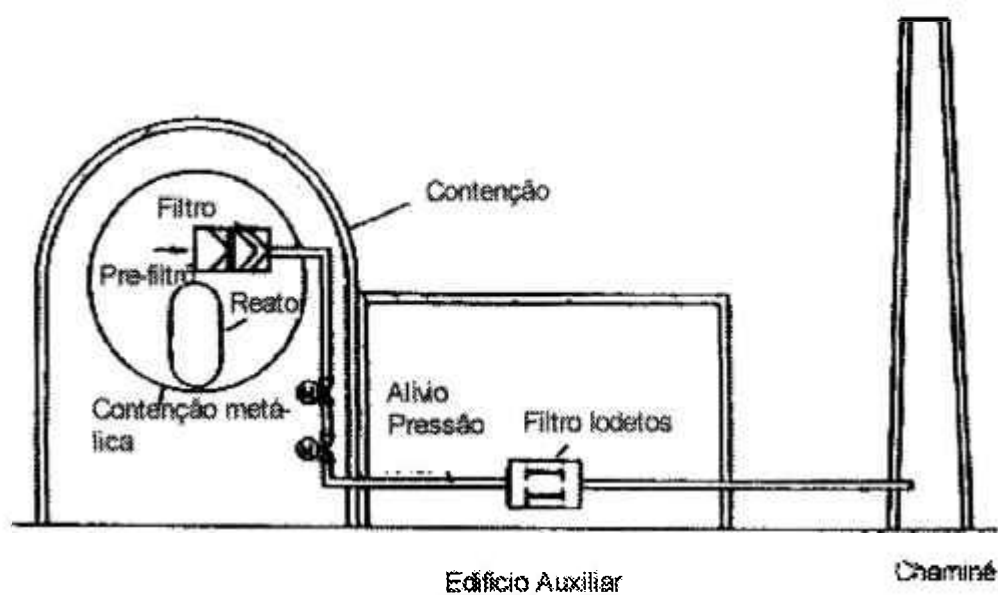


Figura 2.9 - Sistema de alívio da Contenção com filtros de lodetos externo e filtro para aerossóis internos, (DILLMANN & BUNZ, 1991)

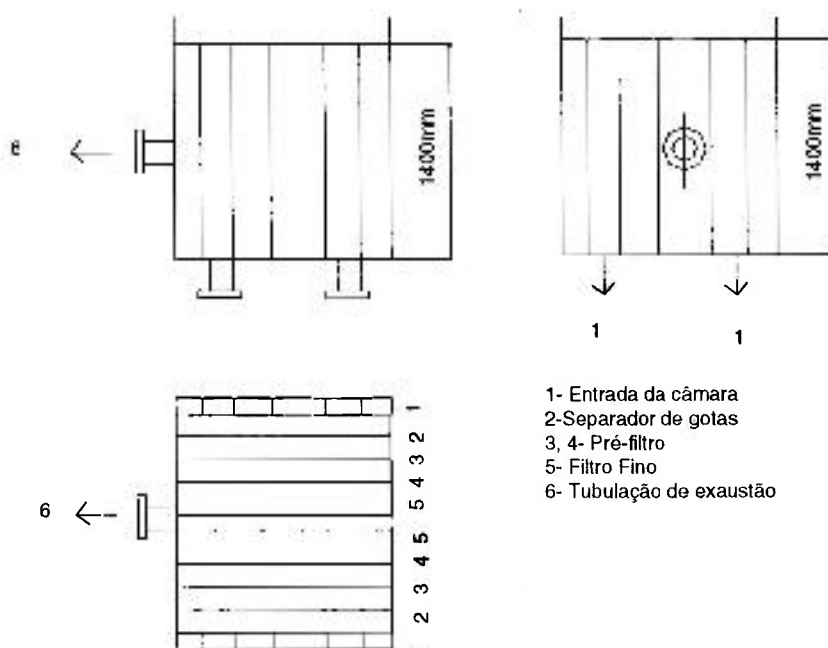


Figura 2.10- Esquema do Filtro do Sistema de Alívio da Contenção, com filtros de lodetos externo e filtro para aerossóis internos, (DILLMANN & BUNZ, 1991)

2.2.4-SUIÇA

Conforme (LOWENHIELM et al., 1994), a Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK) exigiu que todas as cinco plantas nucleares suíças instalassem um sistema de despressurização da contenção.

A capacidade do sistema deve ser suficiente para despressurizar o vapor produzido correspondente a 1% da potência térmica do reator. A capacidade de mitigação para redução da liberação de material radioativo é especificada pelo fator de retenção de 1000 para aerossóis (para limitar uma contaminação do solo) e um fator de 100 para lodo elementar (para limitar doses na tireóide e para prevenir evacuações em curto espaço de tempo). O sistema deve preferencialmente ser passivo, ou seja, o sistema inicia sua operação após um acidente severo, sem qualquer ação do operador ou necessidade de energia. O sistema também deve ter a opção de operação manual.

Os reatores de Beznau, Gösgen, Leibstadt e Mühleberg já selecionaram os sistemas de alívio, entre os vários existentes. Em Beznau foi adotado o sistema Sulzer-EWI, que utiliza piscina de água com placas de chicanas e bicos e elementos mistos para conseguir a filtração desejada dos aerossóis. Nas duas unidades de Beznau, os sistemas estão instalados e funcionam em modo "standby". No reator de Gösgen, optou-se pelo sistema desenvolvido pela Siemens-KWU, conhecido como processo despressurizador "sliding", que combina um "scrubber" com Venturi em uma piscina de água e um filtro. No reator BWR de Leibstadt foi empregado o mesmo sistema de Beznau enquanto o de Muhlbert utilizou o sistema SBB, mas não no projeto usual. A tubulação do Venturi está integrada na piscina de água do "torus" externo.

2.2.4.1-Beznau

A planta de Beznau consiste de duas unidades idênticas: Beznau I e II, cada uma tendo capacidade de saída elétrica de 360MW. Ambas as unidades estão equipadas com reator de água pressurizada e supridas pela Westinghouse. Beznau utilizou o sistema de filtros fornecido pela Sulzer-EWI, o qual possui uma piscina de água com placas de chicanas e “sprays”. Em ambas as unidades o sistema está instalado em modo “standby”.

O sistema Sulzer EWI consiste dos seguintes itens:

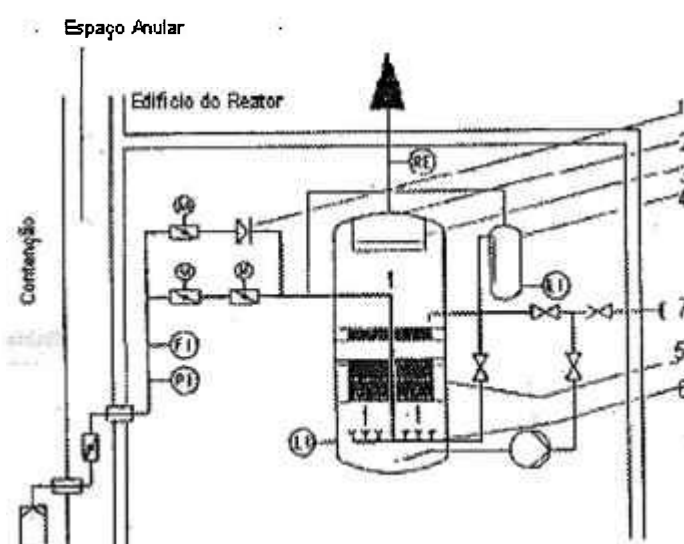
- linha de entrada do filtro com válvulas e com um disco de ruptura;
- vaso do filtro;
- linha de saída do filtro.

Na Fig. 2.11 é mostrado um fluxograma deste sistema. A linha de entrada do filtro conecta o lado interno da contenção com o vaso do filtro via dois caminhos distintos (um ativo e outro passivo).

O caminho ativo contém duas válvulas de isolamento em série, uma válvula de isolamento seguida por uma válvula de isolamento com capacidade de controle. Ambas válvulas de isolamento são motorizadas. O caminho passivo contém uma válvula de isolamento motorizada, normalmente aberta, com capacidade de controle seguida por um disco de ruptura. Todas válvulas de isolamento estão equipadas com mecanismos de atuação manual.

Os dois caminhos paralelos das linhas de entrada do filtro combinam-se após as válvulas de isolamento, em uma única linha, a qual está conectada com o vaso do filtro.

O vaso do filtro trabalha de acordo com o princípio de separadores molhados



- 1-Disco de Ruptura
- 2-Vaso do filtro
- 3-Separador de gotas
- 4-Vaso de tiosulfato de sódio
- 5-Elemento de mistura
- 6-Bicos com placas
- 7-Alimentação de água

Figura 2.11 – Fluxograma do sistema de filtração e alívio da contenção de Beznau

(RUST et al., 1995)

("wet scrubbers"). No filtro a mistura gás-vapor expande-se e os aerossóis, o lodo elementar e o lodo orgânico, são coletados na água e retidos no filtro. O gás limpo é enviado para a linha de saída do filtro que se comunica com a chaminé existente ou diretamente com a atmosfera. Na linha de saída não são utilizadas válvulas de isolamento. Os sistemas auxiliares são necessários para:

- Controle químico da água no filtro
- Suprimento de água para a carga inicial e para o reabastecimento após a drenagem para fins de inspeção
- Suprimento de água de reposição necessária durante a operação do sistema ("make-up").

Na Fig. 2.12 está apresentado um esquema do filtro (LOWENHIELM et al., 1994).

A absorção de lodo elementar como gás, no líquido, aumenta com o tempo de residência e área de contacto. O tempo de residência é da ordem de 5s e a área de contacto é aumentada pelo sistema de "scrubbers". Através do condicionamento químico da água, nestes "scrubbers", possibilita-se a conversão de lodo elementar em forma não volátil. Isto é conseguido através da adição de Carbonato de Sódio ou Hidróxido de Sódio. As espécies não voláteis são lodetos (I^-) e lodatos (IO_3^-).

2.2.4.2-Gösgen

Gösgen está situada em Däniken, Suíça, e é operada pela Gösgen-Däniken AG, sendo equipada com um reator PWR de 1000 Mwe, fornecido pela Power Generation Group (KWU) da Siemens AG.

Com relação ao sistema de alívio da contenção a HSK (Swiss Federal Nuclear

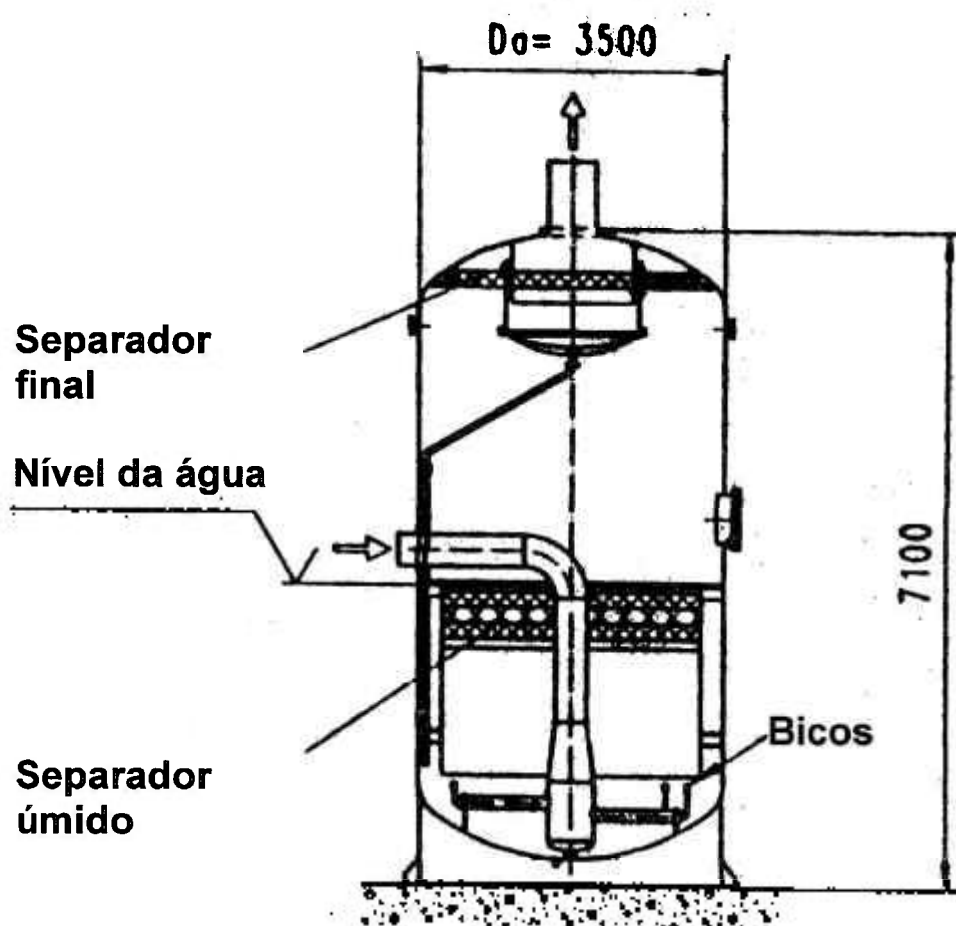


Figura 2.12– Seção do filtro de Beznau (LOWENHIELM et al., 1994)

Safety Inspectorate) – a Comissão de Segurança Nuclear Suíça exigiu os seguintes requisitos:

- O sistema deve remover o fluxo equivalente a 0,5% da potência térmica do reator, ou seja, 6.95kg/s de vapor;
- A pressão de projeto é de 5,89 bar (abs.);
- Fator de descontaminação de 1000 para aerossóis e 100 para lodo elementar;
- Não deve ser necessário repor ou drenar água do scrubber, por um período de 24h de operação;
- A operação do sistema deve ser baseada na hipótese de que o decaimento de calor seja de 400kW, devido aos produtos de fissão retidos;
- A capacidade de retenção deve ser suficiente para um volume total de 150kg de aerossóis; e
- A flexibilidade do processo deve permitir ajuste de fluxo entre 30% e 100%, sempre a pressões de contenção de até 1.5 vezes a pressão de projeto.

Na Fig. 2.13 é mostrado um diagrama do sistema instalado em Gösigen, conforme (LOWENHIELM et al., 1994).

Adicionalmente às exigências da HSK, foi dada ênfase particular à possibilidade de alocar os componentes principais dentro da contenção, pois este arranjo parece ser mais favorável em termos de blindagem, proteção radiológica e segurança física, bem como sua operação. A instalação dentro da contenção traz limitações dimensionais aos componentes do venturi.

O sistema compõe-se de um “scrubber” tipo venturi com filtro de metal-fibra integrados, os quais estão conectados em uma extremidade com a tubulação de alívio e válvulas de isolamento, e na outra extremidade com a chaminé de exaustão da planta, via uma linha equipada com um orifício variável.

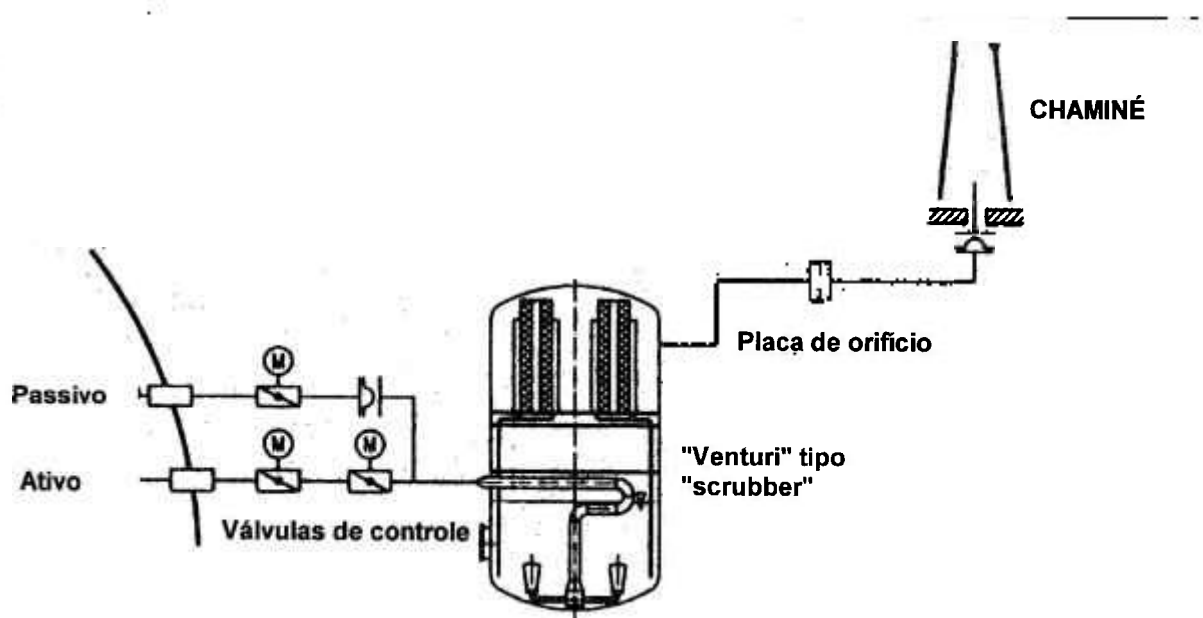


Figura 2.13 – Diagrama do sistema de Alívio instalado em Gösgen (LOWENHIELM et al., 1994).

Para ativar o sistema , as válvulas de isolamento da contenção são abertas por controle remoto, a partir do painel da sala de controle. Uma segunda linha contém uma válvula de isolamento da contenção e um disco de ruptura que permite uma ativação passiva do sistema se a pressão da contenção exceder 6.5 bar (g).

Os dados de projeto do sistema de Venturi com “scrubber” estão abaixo listados:

Eficiência de remoção para aerossóis $\geq 99.99\%$

Eficiência de remoção para Iodeto elementar $\geq 99.5\%$

Capacidade de carga para aerossóis > 200 kg

Capacidade de remoção de calor de decaimento ≥ 400 kW

Ressuspensão de aerossóis durante 24h de operação $\leq 0.0034\%$

Ressuspensão de Iodetos durante 24h de operação $\leq 0.1\%$

2.2.5-VVER

Os reatores do tipo VVER estão instalados em vários países do Leste Europeu, o que sujeita a Europa aos efeitos de acidentes que aí possam ocorrer.

Existem vários estudos conjuntos de países do Leste Europeu com a Alemanha e França a fim de projetar sistemas de alívio da contenção para estes tipos de reatores. Em ECKARDT & BAT'ALIK(1987a), encontramos estudos da Siemens para o reator de Bohunice, cujo diagrama esquemático está mostrado na Fig. 2.14. Nesse sistema a Siemens utilizou um sistema “scrubber” com bicos tipo Venturi (Fig. 2.15).

Para o caso deste tipo de reator o sistema SAF possui características específicas que diferem um pouco dos sistemas similares aplicados a reatores que possuem contenções mais resistentes (PWR e BWR ocidentais).

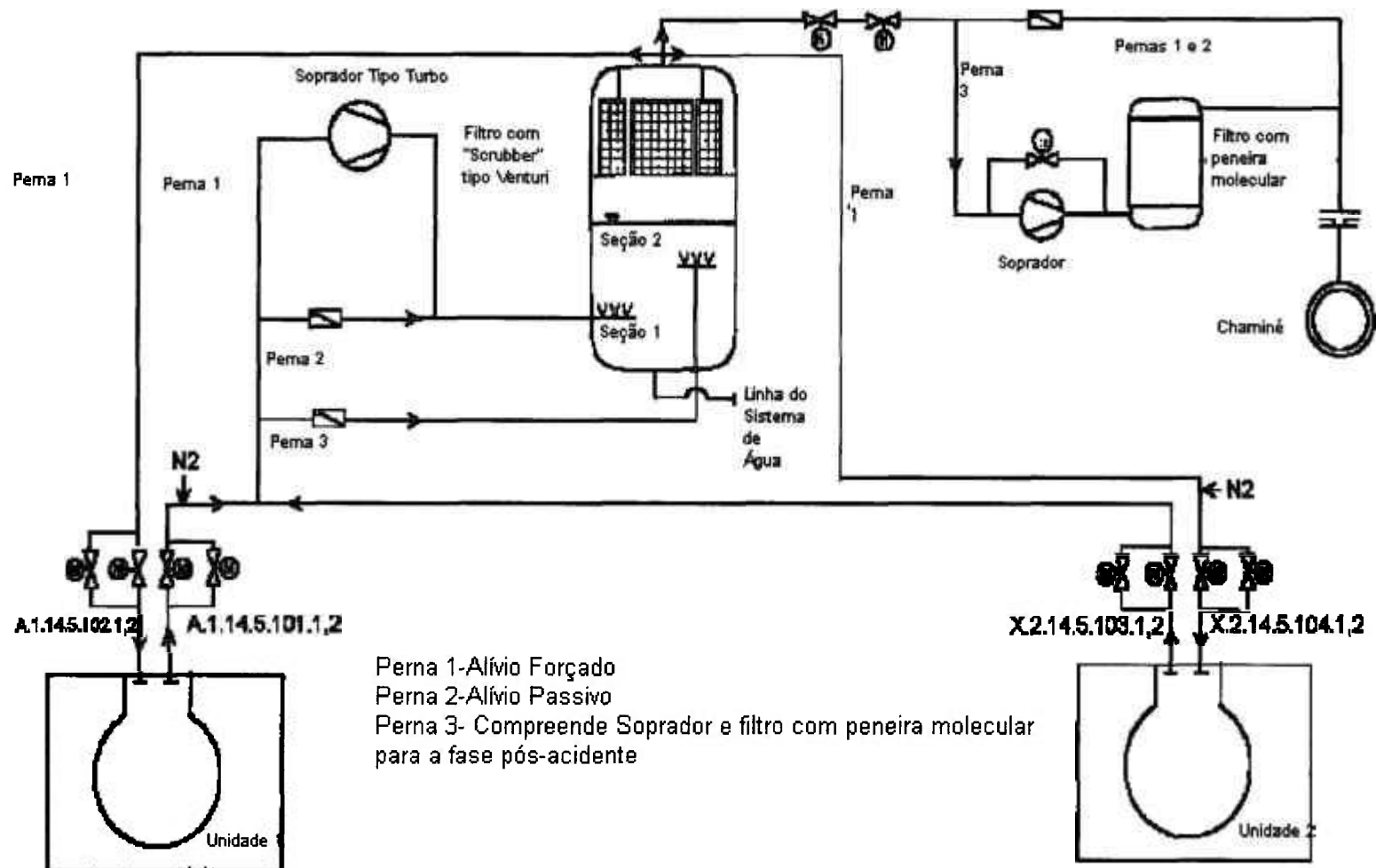


Figura 2.14 – Diagrama Esquemático do sistema de Filtração e Alívio da Contenção em Bohunice (VVER) V1 NPP(ECKARDT & BAT'ALIK, 1987a).

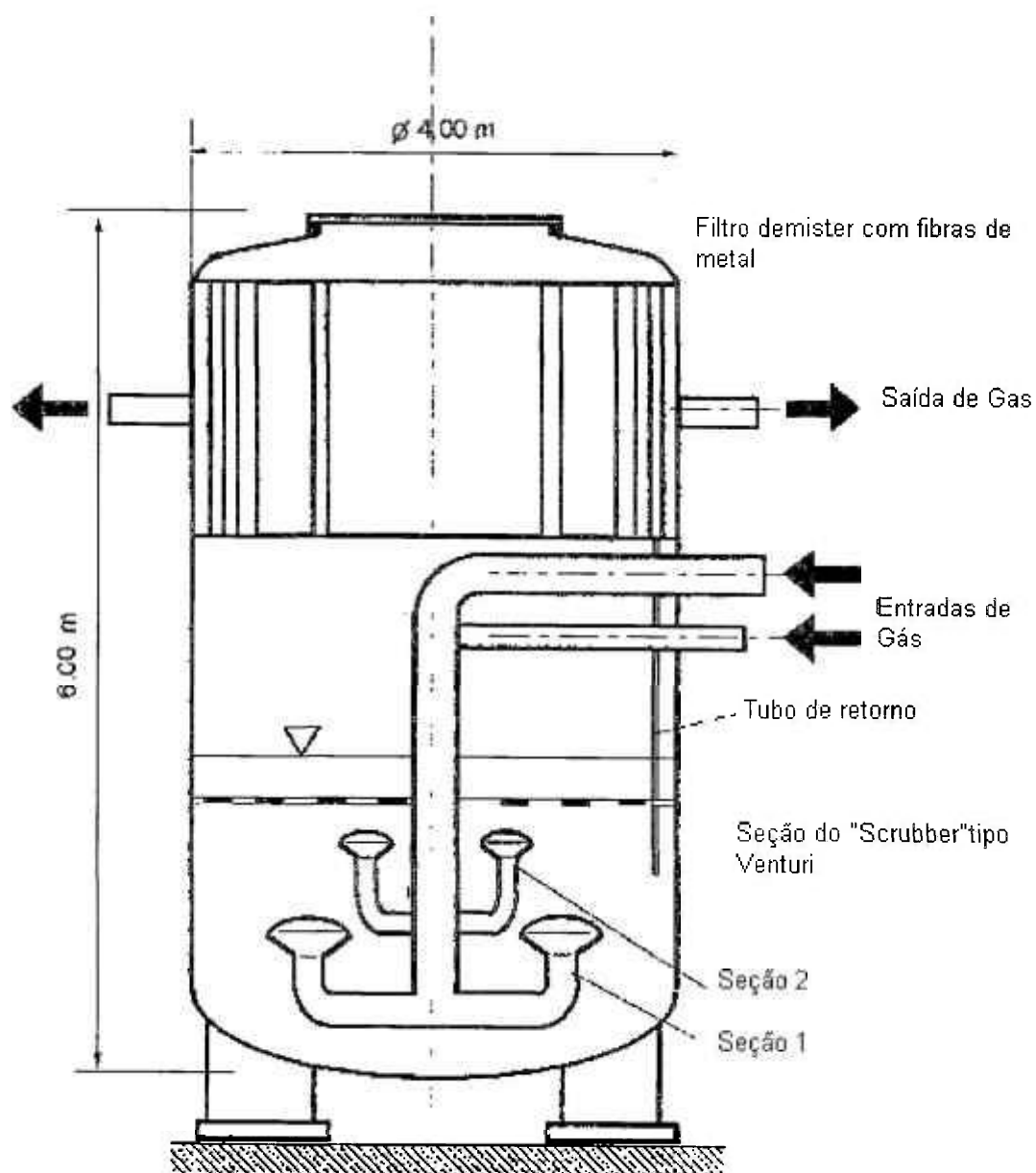


Figura 2.15 – Unidade "Scrubber" com bicos tipo venturi Siemens instalada em Bohunice
(ECKARDT & BAT'ALIK, 1987a)

- Com relação à estanqueidade menor, a camada hermética não pode ser exposta a impactos de pressão por períodos longos de tempo e, por isso, o sistema será operado com um componente de exaustão ativo.

- Com relação à existência de componente de exaustão ativo, projetou-se o sistema tanto aberto (alívio para a chaminé) como fechado (recirculação), o que descartou a utilização do sistema HVAC existente, mas com capacidade insuficiente para o DBA.

- Possibilidade de instalação dentro da edificação e dos sistemas tecnológicos existentes, com necessidade mínima de modificações no "layout".

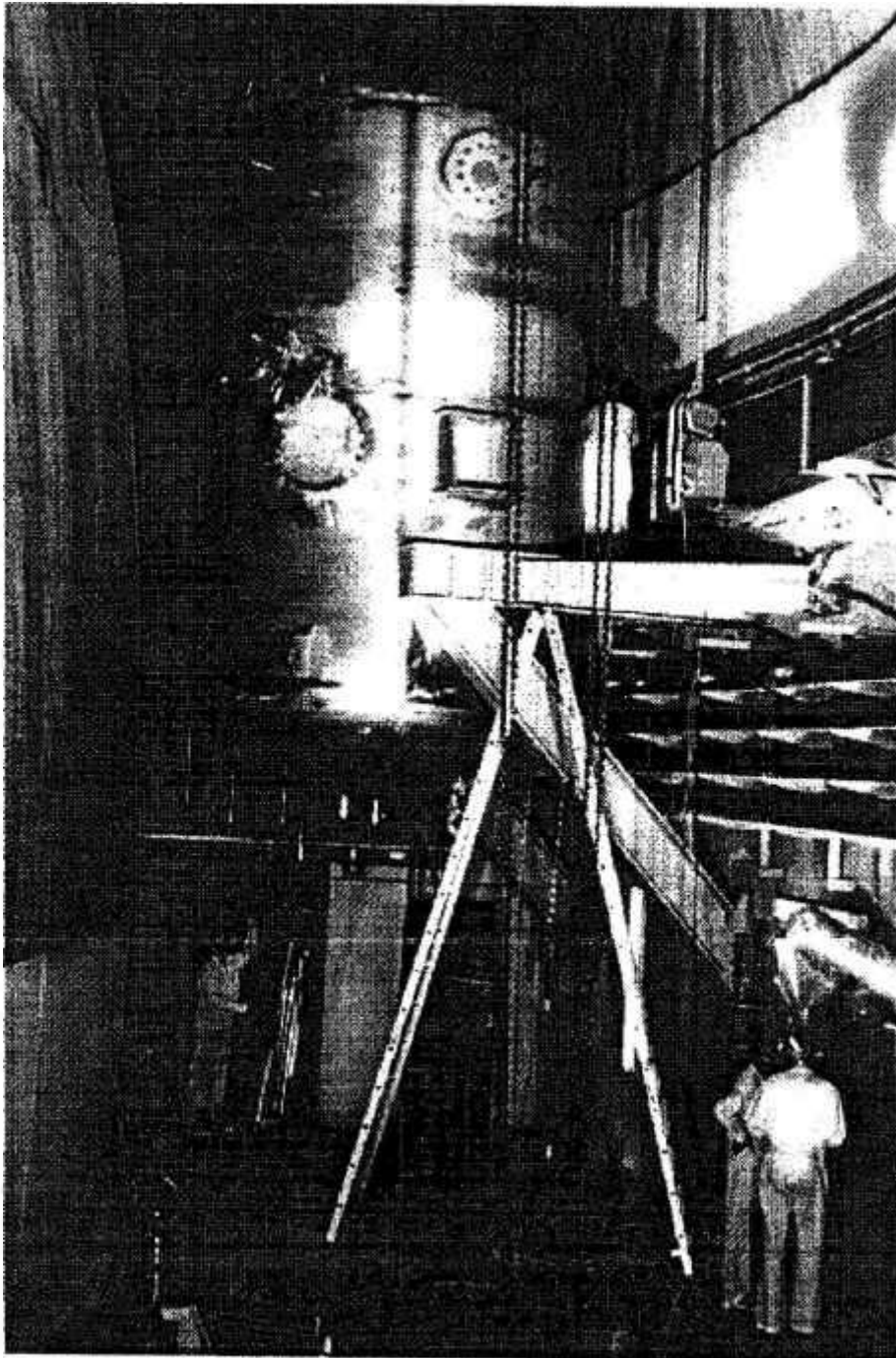
Os itens do sistema, tais como filtros e sopradores, foram qualificados para alcançarem os requisitos técnicos fundamentais.

Na Figura 2.16 é mostrada foto de parte do Sistema de Filtração e alívio da contenção instalado em reator VVER.

2.3- ESTIMATIVA DE CUSTOS

Na Tabela 2.1 estão apresentadas estimativas de custos para instalação de vários sistemas de Alívio e Filtração da Contenção, conforme (SCHLUETER & SCHMITZ, 1990). É importante observar que estes valores são datados de 1990, e atualmente, com o aumento do número de sistemas já instalados, o custo pode ter sido alterado.

SIEMENS



Containment Venting installed in NPP

Figure 7

NDS9/La
5/97
1a57015



Figura 2.16- Sistema de Filtração e alívio da contenção instalado em NPP (ECKARDT & BAT'ALIK, 1987b).

Tabela 2.1 (SCHLUETER & SCHMITZ, 1990)–Estimativa de custos de instalação de sistemas de alívio da contenção com filtros

Sistema	Estimativa de custo (milhões US\$)
<u>Suécia</u> / Sistema de Filtros e alívio	30
<u>França</u> / Sistema de Filtros e alívio	5
<u>Alemanha</u> / Sistema de Filtros e alívio	8
Instalação de alívio para atmosfera	2 a 4
USA/Instalação de filtro de areia/ Projeto do sistema de filtro de areia	20 a 30

Capítulo 3 - CENÁRIOS ACIDENTAIS EM REATORES PWR

3.1-Evolução de um acidente severo

Os acidentes severos são eventos de baixa probabilidade, que ocorrem em caso de falhas múltiplas dos sistemas de segurança e das barreiras da contenção. Como neste tipo de acidente ocorre falha do sistema de refrigeração do núcleo, como consequência o núcleo não consegue manter sua geometria.

A evolução de um acidente severo passa pelas seguintes fases principais:

- Perda de refrigeração;
- Perda da integridade do sistema de refrigeração primário;
- Falha do encapsulamento do combustível e fusão do combustível;
- Fusão através do vaso do reator;
- Perda da proteção da contenção;
- Liberação para o meio ambiente externo.

Estas fases estão detalhadas no item 3.3.

Para melhor se analisar as consequências de um acidente severo, num reator tipo PWR com ou sem SAF, deve-se também avaliar os seguintes parâmetros:

- Duração das fases de liberação;
- Fração do inventário liberada para a contenção;

- Eficiência do sistema de alívio e filtros da contenção;
- Tempo de liberação sem SAF, ou seja, o intervalo de tempo entre o início da falha da contenção até o final da liberação radioativa; e
- Tempo de liberação com SAF, ou seja, o intervalo de tempo entre o início da liberação devido a ruptura do disco até o final da liberação radioativa.

3.1.1- Definições de Termos Fontes

A expressão termo fonte descreve a liberação de material radioativo durante um acidente.

Existem dois tipos de termo fonte utilizados na modelagem de acidentes: o termo fonte para a contenção e o termo fonte para o ambiente. O termo fonte para a contenção descreve a liberação de material a partir do núcleo e circuito de refrigeração primário do reator para dentro da contenção do mesmo. O termo fonte para o ambiente descreve a liberação de material do interior da contenção do reator para o ambiente externo.

O termo "Termo Fonte para a Contenção" é normalmente uma função do tempo e envolverá considerações dos produtos de fissão sendo liberados do núcleo para a contenção bem como da remoção dos produtos de fissão pelos sistemas específicos (p. ex. sistema de "spray").

3.2-Histórico sobre acidentes severos

As liberações devido a acidentes severos foram analisadas pela primeira vez no relatório WASH-1400 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), para o exame das seqüências acidentais que envolviam fusão do núcleo e falha da contenção.

As aplicações de Termo Fonte para acidentes severos foram aceleradas após o acidente de Three Mile Island, em março de 1979. As aplicações correntes deste relatório WASH-1400 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), incluem:

- 1-bases para o dimensionamento do planejamento de zonas de emergência;
- 2-bases para avaliação dos riscos dos acidentes severos e seu impacto no ambiente; e
- 3-bases para priorização e solução dos assuntos genéricos de segurança, assuntos não resolvidos e outras análises regulatórias.

As estimativas de termo fonte, sob condições de acidentes severos, começaram a ser revisadas, principalmente após o acidente de Three Mile Island (TMI), onde foi observado que somente pequenas quantidades de lodo foram liberadas para o ambiente, quando comparadas com a quantidade prevista pelos cálculos do RSS, WASH-1400, US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975).

A NRC iniciou um grande esforço de pesquisa, em 1981, para obter uma melhor compreensão dos mecanismos de transporte e liberação nas condições de acidentes severos. Esse esforço de pesquisa foi realizado em conjunto com vários grupos de laboratórios nacionais e indústrias nucleares. Dessas atividades resultou o desenvolvimento e a aplicação de um grupo de códigos de computação conhecido como "Source Term Code Package" (STCP) (GIESEKE et al., 1986), para examinar a progressão de fusão do núcleo, liberação dos produtos de fissão e transporte pelo meio ambiente. O relatório NUREG-1150 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990), utilizou o STCP como ferramenta para a execução da avaliação de risco para cinco plantas nucleares americanas (Zion, Surry, Sequoyah, Grand Gulf e Peach Bottom)

No documento NUREG-1150(US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990), ficou demonstrado que:

- acidentes severos variavam significativamente entre as plantas nucleares;
- as causas de acidentes severos potencialmente mais importantes eram diferentes para diferentes reatores, e
- as seqüências acidentais mais importantes eram também diferentes para diferentes reatores.

Em 1995, considerando o desenvolvimento subsequente à NUREG-1150 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990), a US Nuclear Regulatory Commission propôs um “Termo Fonte para a Contenção” , para o caso de acidentes severos, no relatório NUREG-1465(SOFFER et al., 1995). Todas seqüências acidentais apresentadas no relatório NUREG-1150 foram revistas e foram efetuados cálculos adicionais utilizando-se os códigos STCP e MELCOR(SUMMERS et al., 1991). As seqüências dominantes consideradas, pelo NUREG-1465 (SOFFER et al., 1995), com impactos significativos nos termos fontes para reatores PWR estão resumidas na TABELA 3.1.

O relatório NUREG-1465 (SOFFER et al., 1995), resume os dados referentes a pesquisa com acidentes severos relacionados à liberação e transporte dos produtos de fissão. Os termos fontes revisados estão expressos na forma de taxas de liberação dos produtos de fissão dentro da contenção, tipos e quantidades das espécies liberadas, e outros atributos importantes tais como forma química do lodo.

Usando análises baseadas nos códigos STCP e MELCOR (SUMMERS et al., 1991), a NRC financiou estudos (JONES,1992), (NOURBAKHSH,1988) e (NOURBAKHSH,1993) que analisaram a grandeza e duração da liberação dos produtos de fissão, além da avaliação da forma química do lodo presente nestas liberações dentro da contenção.

Tabela 3.1 - Seqüências dominantes para acidentes severos em reatores PWR (SOFFER et al., 1995).

Planta	Seqüência	Descrição
Surry	AG	LOCA (perna quente), sem operação do sistema de remoção de calor da contenção
	TMLB'	LOOP, sem PCS e sem ATWS
	V	LOCA na interface
	S3B	SOB com LOCA na RCP
	S2D-δ	SBLOCA, no ECS e combustão de H ₂ .
	S2D-β	SBLOCA com furo de 6", na contenção.
Zion	S2DCR	LOCA (2"), sem ECCS no CSRS
	S2DCF1	LOCA na vedação da RCP, sem ECCS, sem "sprays" na contenção, sem resfriadores – sem queima de H ₂ ou falha do sistema DCH da contenção.
	S2DCF2	S2DCF1 exceto H ₂ ou falha de sobrepressão da contenção.
	TMLU	Transiente, sem PCS, sem ECCS, sem ATWS – falha do DCH da contenção.
Onconee 3	TMLB'	SOB, sem sistemas ESF ativo
	S1DCF	LOCA (3"), no sistema ESF.
Sequoyah	S3HF1	LOCA na RCP, sem ECCS, sem CRS, com cavidade do reator com gases borbulhantes em ascensão.
	S3HF2	S3HF1 com perna quente induzida LOCA
	3HF3	S3HF1 com cavidade do reator seca
	S3B	LOCA (1/2") com SOB
	TBA	SOB induz LOCA na perna quente – falha do sistema de queima de H ₂ na contenção.
	ACD	LOCA na perna quente, sem ECCS e sem CS
	S3B1	SOB atrasado após falha de vedação na RCP, somente o AFW movido a vapor está operante.
Sequoyah	S3HF	LOCA (vedação da RCP), sem ECCS, sem CSRS.
	S3H	LOCA (vedação da RCP), sem recirculação da ECC.

SOB	Falta de energia na planta	LOCA	Acidente com perda de refrigeração
RCP	Bomba de refrigeração do circuito primário	DCH	Aquecimento direto da contenção
PCS	Sistema de conversão de energia elétrica	ESF	Sistemas de engenharia de segurança
CS	Sistema de "spray" da contenção.	CSRS	Sistema de recirculação CS
ATWS	Sistema de antecipação de transiente sem desligamento do reator.	LOOP	Falta de energia elétrica fora da planta.

As ferramentas de cálculo utilizadas no desenvolvimento da modelagem foram principalmente:

- STCP, que analisa o transporte dos produtos de fissão no circuito de refrigeração primário e na contenção;
- CORSOR (KUHLMAN, 1985) que avalia as liberações a partir do combustível;
- TRAPMELT(JORDAN, 1985), que avalia retenção e transporte de produtos de fissão no circuito primário;
- os códigos VANESA e CORCON(POWERS, 1986), que avaliam as interações entre o núcleo e o concreto;
- os códigos SPARC ou ICEDF (OWCZARSKI, 1985 E WINEGARDNER, 1983) são usados em conjunto com NAUA (BUNZ, 1983) para modelar o transporte e retenção dos produtos de fissão liberados do circuito primário e interações do núcleo-concreto dentro da contenção, com subsequente liberação de produtos de fissão para o ambiente, conforme o estado da contenção;
- o código MELCOR (SUMMERS, 1991) avalia de modo mais eficiente o transporte de produtos de fissão, para modelagem dos fenômenos de acidentes severos. Este código foi usado para analisar especificamente seqüências de interesse para fornecer cronologia de acidentes , bem como em detalhar estimativas de comportamento dos produtos de fissão dentro do sistema de refrigeração do reator e outras partes da planta. As seqüências estudadas progrediram para uma fusão completa do núcleo, envolvendo falha do vaso de pressão do reator e incluindo interações do concreto com o núcleo.

3.3-Etapas de um acidente severo

Em contraste com as liberações instantâneas assumidas nos Regulatory Guide 1.3 e 1.4 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1974b e 1974a), as análises das seqüências de acidentes severos mostraram que, apesar das diferenças de projeto e seqüência dos acidentes, tais liberações podem ser divididas em fases fenomenológicas

associadas com o grau de fusão do combustível , integridade do vaso de pressão, e quando aplicável, ataque sobre o concreto dos materiais do núcleo fundido. As fases gerais, ou progressão, de um acidente severo é ilustrada na TABELA 3.2.

3.3.1- Liberação da Atividade do Refrigerante

Inicialmente existe uma liberação da atividade do refrigerante associada com a quebra ou vazamento no sistema de refrigeração do reator.

A fase de liberação da atividade do refrigerante inicia-se com uma ruptura e termina quando a primeira vareta de combustível falha. Durante esta fase, a atividade liberada para a atmosfera da contenção está associada com quantidades muito pequenas de radioatividade dissolvidas no refrigerante. Essa fase está estimada em 30s para PWR tipo Westinghouse assumindo grande LOCA (SOFFER et al., 1995).

3.3.2-Liberação da Atividade do “gap”

Assumindo que a referida perda de refrigeração não possa ser acomodada pelo sistema de reposição de refrigerante do reator ou pelo sistema de refrigeração de emergência do reator, então ocorrerá falha do revestimento, com liberação de atividade localizada na folga entre a pastilha de combustível e o revestimento.

A fase de liberação de atividade do “gap” (folga entre a pastilha de combustível e o revestimento), inicia-se quando ocorre a falha do revestimento. Esta fase envolve a liberação de produtos de fissão presentes nessa folga, sendo liberados para a contenção uma parte do inventário dos radionuclídeos mais voláteis, particularmente gases nobres, I e Cs, permanecendo ainda retidos no próprio combustível os produtos de fissão internos. A fase de atividade do “gap” termina quando a temperatura do centro da pastilha

Tabela 3.2- Fases de Liberação em Acidentes Severos

Fases de Liberação
Liberação da atividade do Refrigerante
Liberação da atividade do “gap” [*]
Liberação inicial dentro do vaso
Liberação para fora do vaso
Liberação final dentro do vaso

(*) folga entre a pastilha de combustível e o revestimento (“gap”)

aumenta suficientemente para que quantidades significativas de produtos de fissão que estavam retidas no combustível sejam liberadas. NOURBAKHS (1988), observa que, para reatores tipo PWR, não ocorre liberação significativa nesta fase, antes de 0.5h após o início do acidente.

3.3.3-Liberação inicial dentro do vaso

Conforme o acidente progride, inicia-se a degradação do combustível, resultando em perda de geometria, acompanhada pela fusão gradual dos materiais do núcleo, que se concentram no fundo do vaso de pressão do reator. Durante este período, pode ocorrer que parte ou a totalidade dos gases nobres e frações significativas dos nuclídeos voláteis, tais como Iodo e Césio, sejam liberados para dentro da contenção. As quantidades desses nuclídeos liberados para dentro da contenção são fortemente influenciadas pelo tempo de residência dos materiais radioativos dentro do circuito de refrigeração primário, durante a degradação do núcleo. Seqüências de acidentes de alta pressão, resultam em tempos de residência e retenções significativas de nuclídeos voláteis dentro do circuito primário. Seqüências de baixa pressão implicam em tempos de residência relativamente curtos e pequena retenção no circuito primário, e consequentemente maiores liberações para a contenção.

Durante a fase inicial de liberação dentro do vaso, o combustível, bem como os materiais estruturais presentes no núcleo, alcançarão temperaturas muito altas, de modo que a geometria do núcleo não é mantida. O combustível e os materiais estruturais fundem-se concentrando-se no fundo do vaso de pressão do reator. Nesta etapa são liberadas para dentro da contenção, quantidades significativas de nuclídeos voláteis bem como pequenas frações de nuclídeos menos voláteis. Esta fase de liberação termina quando a parte inferior do fundo do vaso de pressão do reator se rompe, permitindo que o núcleo fundido entre em contacto com o concreto da base da contenção.

3.3.4- Liberação para fora do vaso

Se o vaso de pressão falhar, podem ocorrer mais duas fases de liberação: liberação para fora do vaso e a liberação final dentro do vaso.

Quando pedaços de núcleo fundido fluem do vaso de pressão do reator para a contenção, ocorre interação com os materiais estruturais do concreto, na cavidade abaixo do reator. Esta é a etapa denominada como Fase de liberação para fora do vaso. Como resultado desta interação nuclídeos menos voláteis podem ser liberados para a contenção.

Liberações para fora do vaso são influenciadas pelo tipo de concreto dentro da cavidade do reator. Os concretos tipo "limestone" (calcários) decompõem-se produzindo quantidades maiores de CO e CO₂ do que os concretos basálticos. Estes gases podem, por sua vez, espalhar um pouco de nuclídeos menos voláteis, tais como Bário (Ba) e Estrôncio (Sr), e pequenas frações de lantanídeos, para a atmosfera da contenção. Grandes quantidades de aerossóis não radioativos podem também, ser liberadas como resultado de interações núcleo-concreto.

A fase de liberação para fora do vaso inicia-se quando o núcleo fundido é liberado para a parte externa do vaso de pressão do reator e termina quando os fragmentos estiverem suficientemente refrigerados de modo que quantidades significativas de produtos de fissão não estejam mais sendo liberadas. Nessa fase, porções significativas de radionuclídeos voláteis, ainda não liberadas durante a etapa anterior, bem como porções menores de radionuclídeos não voláteis, são liberados dentro da contenção. Entretanto as liberações resultantes de interações núcleo - concreto devem ocorrer apenas algumas horas após a quebra do vaso. NOURBAKHS (1988) avalia que a maior

parte dos produtos de fissão (~90%), exceto Telúrio e Rutênio, têm expectativa de liberação de 2h, para reatores PWR .

3.3.5- Liberação final dentro do vaso

A fase final de liberação dentro do vaso começa com o rompimento do vaso e ocorre simultaneamente com a fase de liberação para fora do vaso. Durante esta fase de liberação alguns nuclídeos voláteis depositados dentro do sistema de refrigeração do reator, anteriormente à degradação do núcleo, fundem-se podendo ser re-volatilizados e liberados dentro da contenção. NOURBAKHS(1993), após a revisão da metodologia de incertezas do termo fonte, usada na NUREG1150(US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990), estimou que a fase de liberação dentro do vaso tem uma duração de aproximadamente 10h.

Na TABELA 3.3 encontra-se a duração de cada fase de liberação para reatores tipo PWR .

Dois outros fenômenos que afetam a liberação dos produtos de fissão dentro da contenção poderão ocorrer, tal qual discutido na US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990. São eles:

- Ejeção de material fundido a alta pressão (HPME- high pressure melt ejection), ou seja, se o sistema de refrigeração primário estiver a alta pressão no momento da falha do vaso de pressão, então o material fundido do núcleo poderá ser ejetado para dentro da contenção em alta velocidade. Além de elevar rapidamente a temperatura da contenção, uma quantidade significativa de material radioativo também será dispersada na atmosfera da contenção, principalmente na forma de aerossóis.

- Explosão de vapor resultante de interações entre os pedaços de núcleo fundidos e água: porções do núcleo fundido em contacto com a água podem ocasionar explosões

Tabela 3.3- Duração das fases de liberação para PWR (SOFFER et al., 1995)

Fases de Liberação	Duração
Atividade do Refrigerante	10s a 30s
Atividade da Folga	0.5h
Anterior dentro do Vaso	1.3h
Fora do Vaso	2h
Final dentro do Vaso	10h

de vapor com um aumento da quantidade de produtos de fissão no ar. Explosões de vapor em pequena escala são consideradas comuns, e não resultarão em aumento significativo na atividade do ar. Explosões de vapor em grande escala, por outro lado, podem resultar em aumento significativo da concentração de atividade no ar, mas são bem menos freqüentes.

3.4- Caracterização dos Termos Fontes para a Contenção

Ao considerar acidentes severos, nos quais a contenção falha, o relatório WASH-1400 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), examinou o espectro dos produtos de fissão e agrupou 54 nuclídeos em 7 grandes grupos, com base na similaridade do comportamento químico. Baseado nesse relatório e com a utilização do código STCP (Source Term Code Package) expandiu-se os grupos de produtos de fissão de 7 para 9 grupos, os quais estão listados na TABELA 3.4. Esse agrupamento considerou principalmente as similaridades entre propriedades químicas, físico químicas e meia vida. Os resultados das análises do código SCTP e das análises de incertezas (usando os resultados retirados do painel de termos fontes esperado da NUREG1150), indicam apenas pequenas diferenças entre as liberações de Bário (Ba) e Estrôncio (Sr). Portanto, foi desenvolvida uma revisão do agrupamento dos radionuclídeos reunindo os grupos do Bário (Ba) e Estrôncio (Sr). Adicionalmente aos elementos já incluídos na TABELA 3.5, (ALPERT et al., 1986) concluiu que outros elementos, tais como Curie, podem ter conseqüências radiológicas importantes se liberados em quantidades suficientemente grandes. Por esta razão, o grupo 7 foi revisado para incluir o Curie (Cm) e Amerício (Am), enquanto o grupo 6 está sendo revisado para incluir o Cobalto (Co).

Os grupos de radionuclídeos revisados, utilizados no presente trabalho estão listados na TABELA 3.5. As frações, para cada fase de liberação, incluindo sua duração, estão

Tabela 3.4-Grupos de Radionuclídeos STCP

Grupo	Elementos
1	Xe, Kr
2	I, Br
3	Cs, Rb
4	Te, Sb, Se
5	Sr
6	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc
7	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y
8	Ce, Pu, Np
9	Ba

Tabela 3.5-Grupos de Radionuclídeos Revisados (SOFFER et al., 1995).

Grupos	Título	Elementos do Grupo
01	Gases Nobres	Xe, Kr
02	Halogêneos	I, Br
03	Metais Alcalinos	Cs, Rb
04	Grupo Telúrio	Te, Sb, Se
05	Estrôncio, Bário	Sr, Ba
06	Metais Nobres	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
07	Lantanídeos	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am
08	Grupo Cério	Ce, Pu, Np

Tabela 3.6-Frações Liberadas na contenção para PWR^{*} (SOFFER et al., 1995).

	Fase de liberação no “gap” ^{***}	Fase anterior dentro do Vaso	Fase de liberação fora do vaso	Fase final dentro do Vaso
Duração (h)	0.5	1.3	2.0	10.0
Gases Nobres ^{**}	0.05	0.95	0	0
Halogêneos	0.05	0.35	0.25	0.01
Metais Alcalinos	0.05	0.25	0.35	0.01
Grupo Telúrio	0	0.05	0.25	0.005
Bário, Estrôncio	0	0.02	0.1	0
Metais Nobres	0	0.0025	0.0025	0
Grupo Cério	0	0.0005	0.005	0
Lantanídeos	0	0.0002	0.005	0

*- Os valores mostrados são frações do inventário do núcleo

** - Ver TABELA 3.5 para lista completa dos elementos de cada grupo

*** - A liberação no “gap” é 3% se a refrigeração do combustível for mantida.

**** Os dados apresentados nesta tabela referem-se apenas à interações núcleo-concreto para concreto tipo calcáreo (limestone).

***** As frações de liberação apresentadas para a fase de liberação externa ao vaso estão baseadas na hipótese de que a cavidade do reator esteja seca , não tendo água sobre os fragmentos do núcleo.

listados na TABELA 3.6. Os dados dessa Tabela foram obtidas de (SOFFER et al., 1995), e foram derivados de simplificações da NUREG-1150 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990), documentadas na NUREG/CR-5747 (NOURBAKHS, 1993).

3.5- Limitações dos valores na NUREG-1465 (SOFFER et al., 1995)

Informações obtidas a partir de (SOFFER et al., 1995), indicam que o combustível com “burnup” alto, ou seja, irradiado em níveis superiores a aproximadamente 40GWD/MTU, pode estar mais sujeito a falhas durante acidentes de inserção de reatividade, que os que sofreram menores queimas. O combustível sujeito a alta queima pode estar altamente fragmentado ou pulverizado, de modo que uma falha no revestimento, pode levar a uma liberação do próprio combustível. Por outro lado, o termo fonte apresentado em (SOFFER et al., 1995), é baseado no comportamento do combustível com baixo nível de “burnup”, que permanece intacto mesmo sob falha do revestimento. Na NUREG-1465 (SOFFER et al., 1995) é indicado que os valores ali apresentados não podem ser aplicados a combustíveis com “burnup” alto.

A NRC recomenda que os termos fontes apresentados na TABELA 3.6, particularmente na atividade do “gap”, não sejam aplicáveis para combustíveis com alto nível de “burnup” (maiores que aproximadamente 40 GWD/MTU).

3.6- Forma Química dos Produtos de Fissão

3.6.1- Iodo

A forma química do iodo e seu comportamento subsequente após a saída para a contenção, está documentado na NUREG/CR-5732 (BEAHM et al., 1992a) e na ORNL/TM-12202 (WEBER et al., 1992).

Os resultados da NUREG/CR-5732, (BEAHM et al., 1992a), indicam que o iodo entrando na contenção está 95%, no mínimo, na forma CsI , com os 5% restantes na forma de I_2 mais HI . Já dentro da contenção o CsI , sendo altamente solúvel, dissolve-se na água resultando na forma iônica I^- . O comportamento posterior do iodo, na contenção, depende do intervalo de tempo e do pH da água. Devido à presença de outros produtos de fissão dissolvidos, espera-se que ocorra radiólise, abaixando o pH da água. Sem qualquer controle do pH, os resultados indicam que grandes frações de iodo dissolvido serão convertidos para iodo elementar e podem ser liberados para a atmosfera da contenção. Entretanto se o pH for controlado e mantido em valores próximos de 7 ou maior, muito pouco do iodo dissolvido (menos que 1%) será convertido para iodo elementar. Algumas considerações no controle do pH são discutidas no NUREG/CR-NUREG/CR-5950, Evolução do iodo e Controle do pH, (BEAHM et al., 1992b).

Compostos orgânicos de iodo, tais como iodeto de Metila, CH_3I , podem também ser produzidos como resultado de reações de iodo elementar com materiais orgânicos. A formação de iodetos orgânicos foi investigada no WASH-1233 "Revisão da formação de iodetos orgânicos sob condições de acidentes em reatores refrigerados a água", (POSTMA & ZAVADOWSKI, 1972) e mais recentemente em NUREG/CR-4327, "Formação de iodetos orgânicos após acidentes em reatores nucleares", (BEAHM et al., 1985).

Da análise de vários experimentos de contenção, concluiu-se que, considerando ambos os meios radiolíticos e não radiolíticos, não mais que 3.2% do Iodo na atmosfera será convertido a iodetos orgânicos durante as duas primeiras horas após a liberação dos produtos de fissão. O valor 3.2% foi considerado como o limite superior conservativo e julga-se que seja consideravelmente menor, pois não considera, entre outras coisas, a diminuição da formação radiolítica de iodetos devido a mecanismos de remoção de Iodo dentro da contenção. (BEAHM et al., 1985) também inclui resultados envolvendo elementos combustíveis irradiados, e concluiu que a concentração de iodetos orgânicos dentro da contenção será de aproximadamente 1% da concentração de Iodeto liberado.

A conversão de 4% de Iodeto elementar para orgânico tem sido implicitamente assumida pelo NRC nos Regulatory Guide 1.3 e 1.4 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1974a e b), baseados nos limites superiores das avaliação de resultados no WASH-1233. Entretanto em vista dos resultados apresentados em (POSTMA & ZAVADOWSKI, 1972), que a conversão de 3.2% é sem sombra de dúvida conservativa, um valor de 3% é considerado mais realista. Quando o pH é controlado em valores próximos a 7 ou maiores, o Iodo elementar pode ser considerado em valores não maiores que 5% do total de Iodo liberado, e o Iodo na forma orgânica pode ser considerado não maior que 0.15% (3% de 5%) do Iodo total liberado.

Enquanto os iodetos orgânicos são formados principalmente a partir de reação de Iodo elementar, a (BEAHM et al., 1992b) observou que as reações com HI podem ser importantes.

Os iodetos orgânicos não são facilmente removidos pelo sistema de "spray" da contenção ou pelo sistema de filtros, mas é conservativo assumir que eles não sejam removidos da atmosfera da contenção, uma vez gerados, visto que isso resulta numa superestimativa de doses na tireóide, em longos períodos. Em (POSTMA &

ZAVADOWSKI, 1972) e (BEAHM et al., 1985) discute-se a destruição radiolítica de iodetos orgânicos.

Claramente quando o pH não é controlado em valores de 7 ou maiores, frações significativamente grandes de lodo elementar, bem como iodetos orgânicos, podem ser esperadas dentro da contenção.

3.6.2- Outros produtos de fissão

Todos outros produtos de fissão, exceto os gases nobres e iodetos, discutidos nas seções anteriores, apresentam-se na forma particulada.

3.7- Comportamento da Contenção em Acidentes Severos

3.7.1- Categorias de Liberação

Conforme apresentado no relatório WASH-1400(US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), as categorias de liberação para reatores tipo PWR, podem ser representadas por 9 categorias.

Categoria 1:

Associada com a explosão de vapor no vaso do reator. Envolve grande quantidade de Óxido de Urânio fundido retido no fundo do vaso do reator, finamente disperso em água, possibilitando a ocorrência de uma explosão de vapor de água. Essa explosão libera grande quantidade de energia, rompendo o vaso e, em alguns casos, a contenção, devido a mísseis gerados. A parte fundida do núcleo é então ejetada na atmosfera da contenção. Esta categoria de liberação é prevista como de baixíssima probabilidade.

Categoria 2:

Também associada com a fusão do núcleo, envolve falha do sistema de remoção de produtos de fissão da contenção, seguido por ruptura da mesma, causada por queima do Hidrogênio e sobrepressão de vapor.

Categoria 3:

Inclui alguns dos casos que são similares aos das Categorias 1 e 2, mas envolve sucesso parcial na operação do sistema para remoção dos produtos de fissão da contenção.

Categoria 4:

Envolve a fusão do núcleo, a contenção não está totalmente isolada e falha nos sistemas para remoção dos produtos de fissão da contenção.

Categoria 5:

É similar à Categoria 4, mas o sistema para remoção dos produtos de fissão da contenção permanece operante.

Categorias 6 e 7:

Cobrem casos nos quais o núcleo funde e se concentra na parte inferior da contenção, mas o sistema para remoção dos produtos de fissão da contenção falha; entretanto a parte superior da contenção permanece intacta.

Categorias 8 e 9:

Nas duas categorias o núcleo não funde e somente parte da atividade do “gap” é liberada. A categoria 8 envolve a liberação do “gap” com falha do sistema de isolamento da contenção. A categoria 9 é similar à 8, mas o sistema de isolamento da contenção permanece operando corretamente.

No presente trabalho, o interesse reside na análise de seqüências acidentais que possam levar à falha da contenção. No RSS (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1975), são definidas seqüências em que ocorrem falhas da contenção, conforme segue:

- α - Ruptura da contenção devido à explosão dentro do vaso do reator ;
- β - Falha da contenção resultante da operação inadequada das penetrações nas aberturas do edifício da contenção;
- γ - Falha da contenção devido a queima de Hidrogênio;
- δ - Falha da contenção devido a sobrepressão de Hidrogênio;
- ϵ - Falha da contenção, com o núcleo fundido liberado para fora do vaso do reator.

Para melhor caracterizar os tipos de falhas que podem ocorrer na contenção, o relatório NUREG-1150 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1990), distingue as falhas da contenção conforme a dimensão da mesma:

- Vazamentos: Definido como uma fenda na contenção que pode causar perda de pressão mas não resulta em depressurização da mesma em menos de 2 horas. A dimensão típica da fenda é da ordem de 0.009 m^2 .

- Ruptura: Definida como uma fenda na contenção que poderia implicar em diminuição gradual de pressão, mas com depressurização da contenção dentro de 2h. Para todas cinco plantas analisadas no relatório NUREG-1150(US NUCLEAR

REGULATORY COMMISSION, 1990), a dimensão típica da fenda é da ordem de 0.09 m².

- Ruptura catastrófica: Definida como perda substancial de uma porção da contenção.

Todas as seqüências de falha da contenção podem ocorrer por vários mecanismos. Para facilitar a análise, não especificando o tipo de causa, excetuando-se explosões, o relatório NUREG-1150 (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION., 1990), caracterizou dois tipos de condições que resultam do acidente severo:

- Aumento gradual de pressão: pode durar de algumas horas a alguns dias, dependendo dos fatores específicos do acidente, tais como: disponibilidade de refrigerante na contenção e operacionalidade dos sistemas de segurança.

- Aumento rápido de pressão: os fenômenos que podem levar a um aumento rápido da pressão na contenção, na ordem de segundos, são: a explosão a alta pressão do material fundido do núcleo no fundo do vaso, a deflagração de gases combustíveis e a rápida geração de vapor através de interação do combustível fundido com a água na contenção.

3.7.1.2- Falha da contenção como resultado de explosão

Uma explosão de vapor é o resultado de uma transferência rápida de energia térmica de um líquido quente para água num intervalo de tempo da ordem de milissegundos. Este cenário é de particular interesse na determinação do perfil de risco de um reator pois não somente causa a possibilidade de quebra do vaso, mas, concomitantemente, pode gerar mísseis que podem levar à falha da contenção. Este tipo de falha ("in vessel steam explosion") é denominado modo de falha α , no RSS (US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION., 1975).

O risco de impacto da explosão de vapor não está confinada à fase dentro do vaso “in vessel” de um acidente severo. Quando existe água na cavidade do reator ou na região pedestal, no momento da falha do vaso, o contato entre o núcleo fundido com a água fora do vaso poderá resultar em problemas para a contenção. Note-se que uma explosão de vapor fora do vaso pode resultar não somente em uma carga impulsiva, mas também em carga de pressão quase-estática nas estruturas da contenção. As consequências associadas com explosões de vapor “ex-vessel” (fora do vaso) e “in vessel” (dentro do vaso) podem resultar em falha da contenção.

O SAF atua eficientemente apenas nos casos de falha tipo ϵ e sem a ocorrência de explosões.

3.7.2- Estratégias de Alívio da Contenção

A operação de um SAF depende da estratégia de alívio da contenção a ser utilizada. Algumas estratégias foram consideradas no passado (SCHECHTMAN & HEISING, 1996), e podem ser agrupadas quanto ao fluxo de alívio do seguinte modo:

- Estratégia de fluxo de alívio alto; e
- Estratégia de fluxo de alívio baixo.

Podem também ser agrupadas quanto ao modo de operar o sistema como:

- Estratégia de alívio da pressão da contenção; e
- Estratégia de alívio antecipado da contenção.

A estratégia de fluxo de alívio alto envolve a utilização de tubulação de penetração com elevados diâmetros. Essa estratégia seria utilizada no caso da prevenção da pressurização que pode ocorrer devido a reações, na fase de liberação para fora do vaso, de aumento muito rápido da pressão. CYBULSKIS et al.(1981) avaliaram que o diâmetro da tubulação de penetração alcançaria até 5.5m para o caso estudado naquele relatório.

A estratégia de fluxo baixo seria utilizada para prevenir a pressurização resultante do vapor gerado pelo calor de decaimento e pelos gases não condensáveis produzidos pelas interações núcleo-concreto, na fase de liberação para fora do vaso (SCHECHTMAN & HEISING, 1996).

Na estratégia de alívio da pressão da contenção, ela é despressurizada por um conjunto de válvulas que abrem quando a pressão na contenção excede o valor pré-selecionado e fecha novamente quando a pressão cai para valor abaixo do pré-selecionado. A maior vantagem dessa estratégia é a sua simplicidade, a ausência de envolvimento do operador e o pequeno potencial de efeitos adversos ou liberações desnecessárias.

Na estratégia de alívio antecipado da contenção, a mesma seria aliviada para a atmosfera, no intervalo entre o início da fusão do núcleo e a ocorrência da queda de pressão no vaso do reator. Devido à redução da pressão inicial na contenção, essa estratégia previne a falha da contenção devido à pressurização rápida ou explosões. Nessa estratégia, a decisão de aliviar a contenção depende de julgamento do operador de que o acidente, no futuro, irá resultar em falha da mesma. Então essa estratégia potencialmente pode causar liberações desnecessárias.

Assim, a estratégia adotada atualmente é a de alívio da contenção, quando a pressão atingir um valor pré-selecionado. Inclusive os sistemas adotam discos de ruptura, para se obter sistemas passivos. Conforme descrito no item 2.2, os sistemas de válvulas de controle podem atuar e controlar, se necessário, o fluxo de alívio da contenção.

SCHECHTMAN & HEISING(1996) mostra os resultados de cálculos de resposta da pressão na contenção, utilizando o SAF (para diâmetro da tubulação de alívio=0.3m), durante a fase de liberação para fora do vaso, num acidente severo, utilizando a

modelagem do código MARCH, para a contenção do reator da planta de Surry. Este resultado está mostrado no gráfico da FIGURA 3.1, em que ocorre o aumento de pressão na contenção, com pico de pressão com uso do SAF na faixa de 0.42 a 0.5MPa.

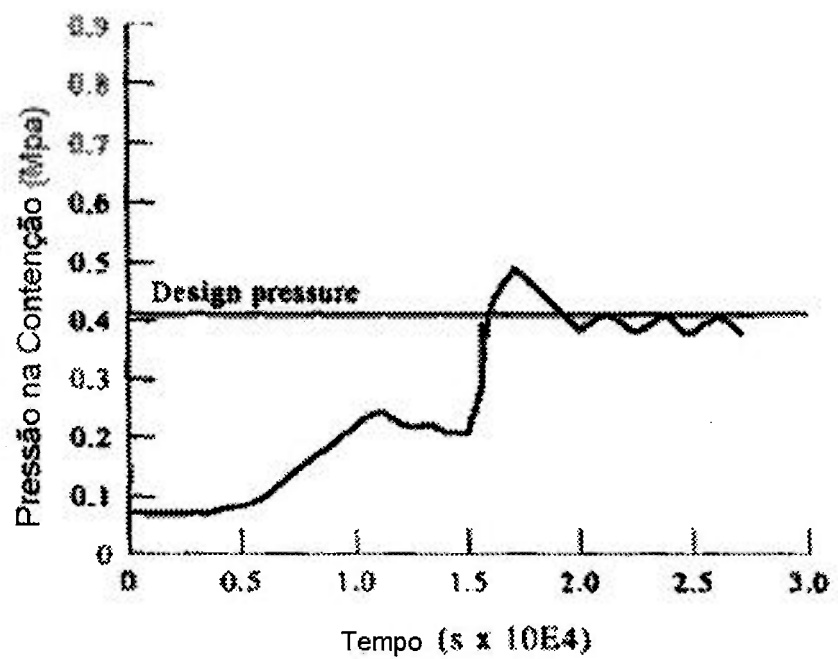


Figura 3.1- Efeito do SAF em acidente severo para a contenção do reator de Surry (Diâmetro da tubulação de alívio=0,3m) (SCHECHTMAN & HEISING, 1996).

Capítulo 4 - AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS

As consequências radiológicas de um acidente severo podem ser estimadas a partir dos seguintes passos principais:

- a- estimativa do termo fonte ambiental;
- b- conhecimento das condições meteorológicas; e
- c- estimativa de doses para os indivíduos do público

A Figura 4.1 ilustra esse processo. A dose recebida por um indivíduo exposto à radiação é função não somente do termo-fonte ambiental e das condições meteorológicas, mas também das possíveis ações de proteção previstas no planejamento de emergência.

O cálculo de doses deve considerar os vários caminhos de exposição à radiação (pluma, inalação, contaminação do solo, ingestão), utilizar modelos dosimétricos para a quantificação dos efeitos imediatos e crônicos, e os correspondentes modelos de dose-resposta. A Figura 4.2, mostra um esquema simplificado de estrutura necessária ao cálculo de doses e suas consequências .

Os efeitos crônicos podem resultar da exposição a pequenas doses de radiação ou a doses maiores mas de pequena taxa. Essas doses podem, a longo prazo, provocar câncer e mutações genéticas mas não produzem efeitos observáveis a curto prazo.

Os efeitos agudos são resultantes da exposição a elevadas doses de radiação em curtos intervalos de tempo. As doses agudas podem colocar em risco, a curto e longo

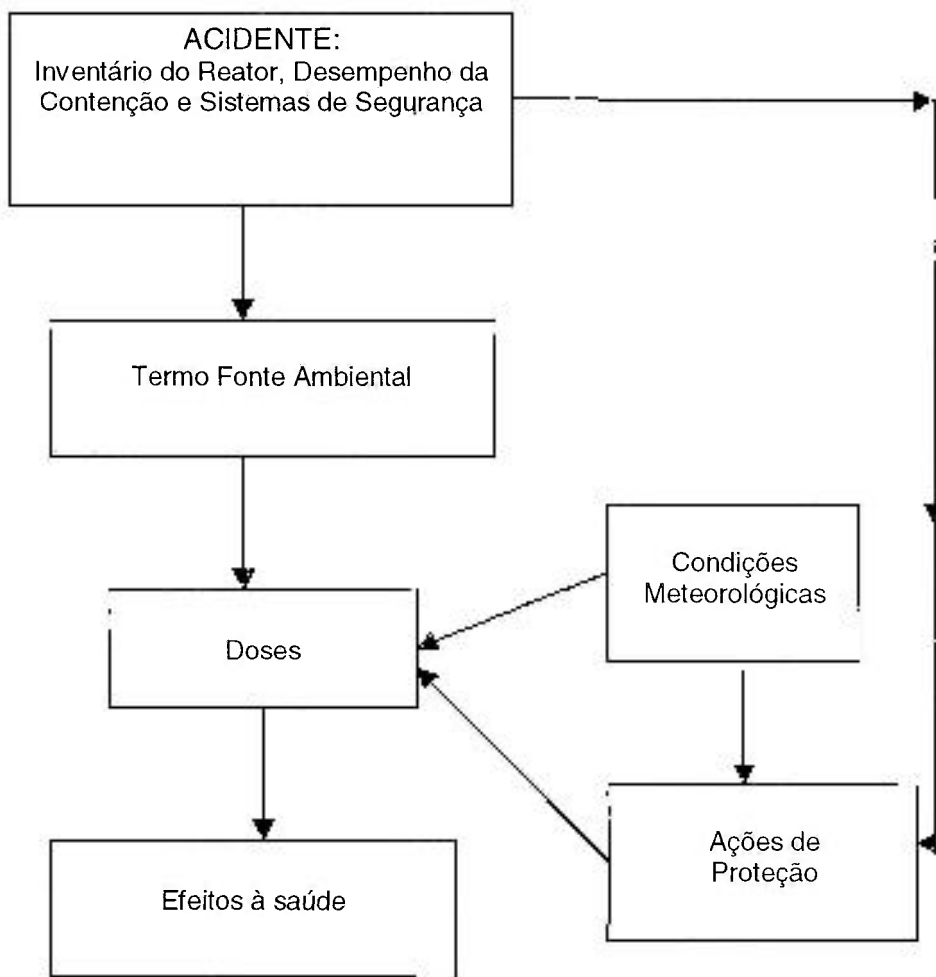


Figura 4.1- Principais Etapas da Avaliação das Consequências Radiológicas

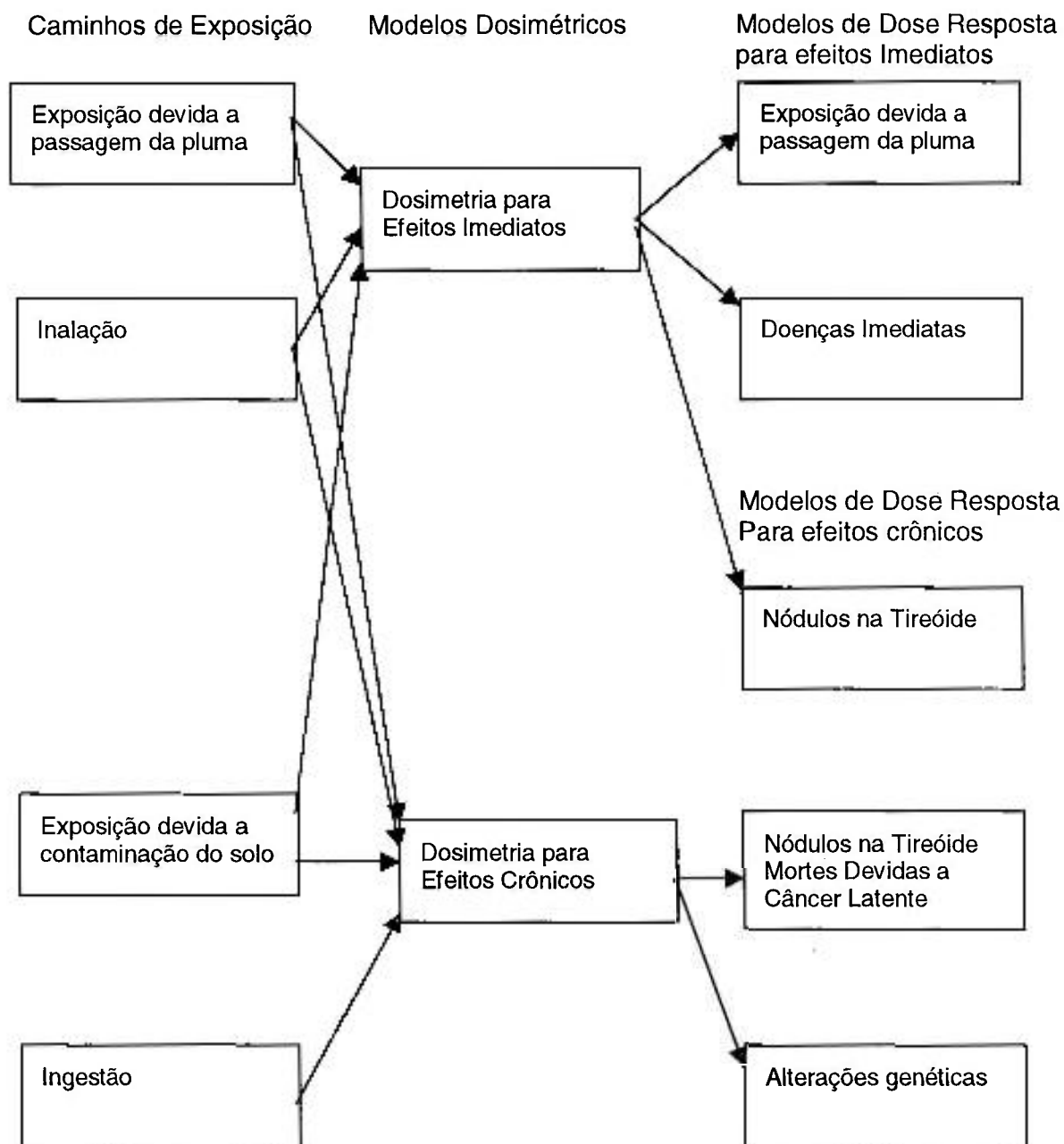


Figura 4.2 – Esquema dos caminhos de exposição considerados no modelo dosimétrico e de efeitos à saúde.(FERREIRA, 1992).

prazos, a saúde dos indivíduos expostos. Se a radiação for suficientemente intensa, ela pode causar danos irreversíveis ao organismo, podendo levar à morte.

As ações de proteção adotadas em decorrência de um acidente severo têm por objetivo evitar exposição a doses suficientemente elevadas para causar o risco de efeitos agudos e crônicos. Detalhes sobre as medidas emergenciais e suas fases são apresentadas na Seção 4.6, deste Capítulo.

A ferramenta utilizada na avaliação quantitativa das consequências é o código PC-COSYMA (JONES,1996). O PC-COSYMA (Code System from Maria) é um programa que avalia o impacto de liberações de material radiativo para a atmosfera, desenvolvido pela Comissão Europeia a partir do programa **MARIA** (Methods for Assessing the Radiological Impact of Accidents), em conjunto com o FZK (Forschungszentrum Karlsruhe) na Alemanha e NRPB (National Radiological Protection Board Advice) na Inglaterra.

O código avalia a concentração no ar e a deposição dos nuclídeos, as doses recebidas pelos membros da população; os riscos coletivos e individuais de danos à saúde na população exposta; a extensão e duração de contramedidas que podem ser impostas para reduzir os efeitos da saúde; e os seus custos econômicos e efeitos à saúde. Ele pode ser usado para cálculos determinísticos ou probabilísticos.

4.1- Termo Fonte

O termo fonte para acidentes severos foi discutido em detalhes no Capítulo 3. No modelo utilizado pelo código PC-COSYMA, o termo fonte é especificado na forma de inventário, considerando até 200 radionuclídeos, subdivididos em até 14 grupos, e a cada grupo está associada uma fração de liberação específica. O modelo considera o

decaimento radioativo no período de tempo entre o desligamento do reator até o início da liberação para o ambiente.

A liberação para o meio ambiente pode ser dividida em 6 fases, com duração de 1 hora cada uma. Não é necessário que cada fase se inicie logo após o término da anterior. Em cada fase são especificados o tempo decorrido desde o desligamento do reator até o início da fase; e a fração do inventário de cada grupo de radionuclídeos.

4.2- Cálculo de doses

Em decorrência da liberação de material radioativo para a atmosfera os indivíduos são irradiados por vários caminhos de exposição, conforme ilustrado na Figura 4.2.

O código PC-COSYMA considera todos esses caminhos, permitindo o cálculo de:

- irradiação γ externa devida à nuvem radioativa;
- irradiação interna por inalação do material radioativo da nuvem;
- irradiação β externa devida à deposição de material radioativo na pele e/ou roupas;
- irradiação γ externa a partir de material depositado no solo; e
- irradiação interna por inalação de material radioativo ressuspenso após a sua deposição inicial no solo.

As três primeiras vias de exposição somente afetam as pessoas expostas à passagem da nuvem radioativa. A irradiação externa pela nuvem somente ocorre quando a mesma está presente. O material radioativo somente é inalado enquanto a nuvem está presente, mas pode ser retido no corpo por longos períodos de tempo, de modo que a

exposição pode persistir por longos períodos. A irradiação pela terceira via cessa a partir do momento em que o material for removido da roupa ou da pele.

As outras duas vias (deposição e inalação) podem levar a exposições que perduram por longos períodos de tempo, visto que o material depositado permanece no solo um tempo muito maior, em comparação com o tempo de passagem da nuvem, responsável pela exposição das três primeiras vias. O tempo que o material ressuspenso permanece afetando os indivíduos também é longo, visto que ele é ressuspenso continuamente até que o material depositado seja retirado ou transformado por decaimento radioativo.

As doses individuais, calculadas em pontos pré-definidos pelo usuário, são obtidas em função da distância ao ponto de liberação e da direção de transporte da pluma.

A dose coletiva é obtida considerando-se a distribuição populacional nas vizinhanças do reator (vide Figura 4.3). O tratamento dado pelo PC-COSYMA à distribuição populacional é detalhado na Seção 4.5 deste Capítulo.

A dose coletiva em cada setor é obtida pelo produto da dose individual no ponto médio desse setor pela população do setor. A dose coletiva da população exposta é obtida pela somatória das doses coletivas de cada setor.

Os modelos de cálculo de doses utilizados no PC-COSYMA foram desenvolvidos por Hasemann (HASEMANN e EHRHARDT, 1994) e Steinhauer (STEINHAUER, 1992).

O PC-COSYMA calcula a dose equivalente em cada órgão, utilizando os fatores de peso dos tecidos de acordo com o ICRP-26 ou ICRP-60. No presente trabalho utilizou-se os valores de acordo com o ICRP-60 que estão apresentados na Tabela 4.1.

4.2.1.- Dose imediata devido à exposição externa

As vias de exposição externa consideradas pelo PC-COSYMA, incluem:

- irradiação γ a partir do material radioativo da nuvem;
- irradiação γ a partir do material radioativo depositado no solo; e
- irradiação β na pele a partir do material depositado na pele e roupas.

4.2.1.1- Dose externa devida à irradiação pelo material da nuvem.

A dose γ externa, D_{CL} (Sv), para cada órgão, devida à passagem da pluma é calculada, em cada ponto da grade (i,j) como o produto da concentração efetiva de radionuclídeos na nuvem A_{CL} (Bq.s/m³), integrada no tempo, pelo fator de conversão de dose, F_{CL} (Sv.m³/Bq.s) e pelo fator de abrigagem SF_{CL} para pluma semi-infinita e de concentração uniforme.

São utilizados os fatores de conversão de dose, específicos para cada radionuclídeo (k) e órgão considerado (o), dados por Muller (MULLER et al, 1991).

Os fatores de abrigagem aqui utilizados são apropriados para pessoas que estão em atividades normais ou na parte externa das casas ou prédios.

Portanto, D_{CL} é dada pela expressão:

$$D_{CL}(o) = SF_{CL} \cdot \sum_k A_{CL}(k) \cdot F_{CL}(o,k) \quad (4.1)$$

onde:

$D_{CL}(o)$ – Dose externa em cada órgão devida à passagem da nuvem, calculada em cada ponto da grade (i,j)

Tabela 4.1- Órgãos alvo e fatores de peso conforme o ICRP (HASEMANN & EHRHARDT, 1994).

Órgão/Tecido	ICRP-26	ICRP-60
Medula óssea	0,12	0,12
Superfície dos Ossos	0,03	0,01
Seios	0,15	0,05
Colon	---	0,12
Pulmões	0,12	0,12
Timo	---	0,05
Pele	---	0,01
Tireóide	0,03	0,05
Gônadas (ef. Hereditários)	0,25	0,20
Outros órgãos	0,30	0,05

$A_{CL}(k)$.-Concentração inicial integrada no tempo ($Bq.s/m^3$);

SF_{CL} - Fator de abrigagem para a nuvem, sendo que nesse trabalho utilizou-se o valor 0,16

k – representa o índice para cada radionuclídeo

$F_{CL}(o,k)$ – Fator de Conversão de dose para a irradiação da nuvem

4.2.1.2- Dose externa devida à irradiação pelo material depositado no solo.

A dose γ externa, D_{GR} (Sv), a partir do material depositado é calculada como o produto da quantidade de material depositado pelo fator de conversão de dose por deposição F_{GR} , ($Sv.m^2/Bq$) e pelo fator de abrigagem SF_{GR} .

Então, D_{GR} é dada por:

$$D_{GR}(o, PID) = SF_{GR} \cdot \sum_k G_{GR}(k) \cdot F_{GR}(o,k, PID) \quad (4.2)$$

onde:

$D_{GR}(o)$ – Dose externa em cada órgão devido ao material depositado, integrada no período de tempo PID e calculada em cada ponto da grade (i,j) (Sv)

$G_{GR}(k)$ - Concentração inicial de Radionuclídeos no solo (Bq/m^2);

SF_{GR} - Fator de abrigagem para o material depositado no solo, em condições normais de atividade.

O fator de abrigagem utilizados no presente trabalho são apropriados para pessoas que estão em atividades normais ou na parte externa das casas ou prédios.

O fator F_{GR} , utilizado pelo PC-COSYMA, considera a contribuição dos radionuclídeos mais importantes presentes numa liberação acidental (Ru-103, Ru-106, I-

131, Te-132, Cs-134, Cs-137 e Ba-140), bem como a contribuição dos radionuclídeos formados por decaimento radioativo.

Os fatores que permitem a blindagem por construções, não foram utilizados neste trabalho, pois não se considerou a ocorrência de ação de emergência para o cálculo da dose.

4.2.1.3- Dose β externa na pele

A dose β na pele, a partir do material depositado na mesma e roupas, é obtido a partir da quantidade de material depositado na pele e roupas pelo tempo que o material aí permanece, e pelo fator de conversão de dose de deposição.

A deposição na pele ou roupas é calculada como sendo um múltiplo da deposição seca no solo no mesmo local. O intervalo de tempo que o material permanece na pele é calculado usando a meia via efetiva do material na pele. O fator de conversão de dose por deposição é derivado do modelo descrito por Jacobi (JACOBI et al, 1989). A taxa de dose assim obtida, refere-se à área da pele em que existe depósito, mas não está coberta por roupas, pois essa área coberta é assumida como recebendo menor dose devido ao efeito da roupa.

Calcula-se a concentração de material depositado na roupa e pele A_{SK} (Bq/m^2) pelo produto da concentração no ar integrada no tempo AA ($Bq.s/m^3$) pela velocidade de deposição v_D (m/s) para cada tipo de radionuclídeo e pelo fator de abrigagem com relação à concentração no ar SF_{SK} .

Então A_{SK} é dada por:

$$A_{SK}(k) = AA(k) \cdot SF_{SK} \cdot v_D \quad (4.3)$$

Já a dose devida à pele irradiada, D_{SK} , é calculada pelo produto da contaminação inicial da pele ou roupas $A_{SK}(k)$ pelo fator de conversão de dose para contaminação da pele, F_{SK} , pela integral de tempo $U(k)$.

Então:

$$D_{SK}(0) = \sum_k A_{SK}(k) \cdot F_{SK}(k) \cdot U(k) \quad (4.4)$$

e

$$U(k) = \frac{T_{eff}}{\ln 2} \times \left(1 - e^{\frac{-\ln 2}{T_{eff}} \cdot T_{SKIN}} \right) \quad (4.5)$$

Com:

SF_{SK} - Fator de abrigagem para a deposição na roupa e pele, em condições normais de atividade ou fora de casa, tendo sido utilizado no presente trabalho o valor 0.57.

T_{SKIN} - Tempo de descontaminação da pele após a passagem da nuvem, em s;

T_{eff} - Meia vida efetiva considerando a meia vida biológica da pele, T_B , e a meia vida física do radionuclídeo, T_P , em s^{-1} e:

$$T_{eff} = \frac{T_P \cdot T_B}{T_P + T_B} \quad (4.6)$$

4.2.2- Dose imediata devido à exposição interna

A exposição interna imediata considerada no PC-COSYMA inclui a inalação do material da nuvem e a inalação do material posteriormente ressuspenso.

4.2.2.1- Dose interna devida à inalação do material da nuvem

A dose devida ao material inalado a partir da nuvem, integrada no período PID para cada ponto da grade (i,j), D_{IH} (Sv), é calculada como produto da concentração do ar, próxima ao solo, integrada no tempo, pela taxa de respiração, B_R (m³/s), pelo fator de conversão de dose por inalação, F_{IH} (Sv/Bq), e pelo fator de abrigagem em condições normais, SF_{IH} .

Portanto, D_{IH} é dada pela expressão:

$$D_{IH} (o, PID) = B_R \cdot SF_{IH} \cdot \sum_k AA(k) \cdot F_{IH}(o,k,PID) \quad (4.7)$$

onde:

AA - Concentração inicial integrada no tempo (Bq.s/m³)

B_R - O valor da taxa de respiração aqui utilizada é a média para adultos igual a $2,67 \times 10^{-4}$ m³/s.

F_{IH} - Fator de conversão de dose para inalação em um determinado órgão (o), devido ao radionuclídeo k , integrado no tempo PID.

SF_{IH} - Fator de blindagem médio para inalação, em condições de atividades normais ou fora de casa ou prédio, tendo sido utilizado no presente trabalho o valor 0,14.

4.2.2.2- Dose interna devida à inalação do material ressuspensão

A dose interna devida à inalação de radionuclídeos ressuspensos, integrada no período de tempo PID para cada ponto da grade (i,j), D_{IHR} (Sv), é calculada como sendo o produto da concentração de material ressuspensão no ar integrada no tempo, pela taxa de respiração, B_R (m³/s); pelo fator de conversão de dose para a inalação dos

radionuclídeos ressuspensos, F_{IHR} (Sv/Bq); pela função que retrata a ressuspensão e a migração no solo e pelo fator de blindagem para material ressuspenso SF_{IHR} .

Portanto, D_{IHR} pode ser obtida pela equação:

$$D_{IHR}(0, PID) = B_R \cdot SF_{IHR} \cdot \sum_k AG_0(k) \cdot F_{IHR}(0, k, PID) \cdot RESUS(k, PID) \quad (4.8)$$

onde:

$AG_0(k)$ - Concentração inicial do material no solo (Bq/m^2);

$RESUS$ - Função que retrata a ressuspensão e a migração no solo, em s^{-1} .

SF_{IHR} - Fator de blindagem médio para inalação de material ressuspenso, em condições de atividades normais ou fora de casa ou prédio, tendo sido utilizado no presente trabalho o valor 0.55.

Essa função é descrita por:

$$RESUS(k, PID) = 0.63 \times \frac{r_0}{\lambda_1 + \lambda_r + \lambda_k} \times (1 - e^{-PID \cdot (\lambda_1 + \lambda_r + \lambda_k)}) + 0.63 \times \frac{r_e}{\lambda_1 + \lambda_k} \times (1 - e^{-PID \cdot (\lambda_1 + \lambda_k)}) + 0.37 \times \frac{r_0}{\lambda_2 + \lambda_r + \lambda_k} \times (1 - e^{-PID \cdot (\lambda_2 + \lambda_r + \lambda_k)}) + 0.37 \times \frac{r_e}{\lambda_2 + \lambda_k} \times (1 - e^{-PID \cdot (\lambda_2 + \lambda_k)}) \quad (4.9)$$

onde:

λ_k = Constante de decaimento radioativo em s^{-1} , para cada radionuclídeo;

λ_1, λ_2 = Constantes meteorológicas, em s^{-1} ;

r_0, r_e = Coeficientes de ressuspensão em m^{-1} ;

λ_r - constante de ressuspensão em s^{-1} ;

Os valores dos coeficientes e constantes acima estão apresentados na Tabela

Tabela 4.2 – Parâmetros para cálculo da função de ressuspensão RESUS (HASEMANN & EHRHARDT, 1994).

Coeficiente	Parâmetro	Valor padrão
r_0	RES0	$10^{-5} \text{ (m}^{-1}\text{)}$
re	RESE	$10^{-9} \text{ (m}^{-1}\text{)}$
λ_r	WLAMR	$1.62 \cdot 10^{-7} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
λ_1	WLAM1	$1.5 \cdot 10^{-8} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
λ_2	WLAM2	$2.38 \cdot 10^{-10} \text{ (s}^{-1}\text{)}$

4.3- Efeitos imediatos à saúde

Os efeitos imediatos modelados pelo PC-COSYMA incluem mortes e patologias resultantes da exposição a altas doses de radiação.

A Tabela 4.1 lista os efeitos incorporados aos modelos. A lista inclui as causas de morte para os quais são conhecidos os efeitos dose-resposta. Inclui também efeitos não fatais que resultam em deficiências permanentes ou que requerem tratamento médico contínuo.

Os efeitos imediatos são estimados por modelos de dose-resposta que fornecem o risco R de um indivíduo ser afetado pela radiação.

O risco R é dado pela expressão:

$$R = 1 - e^{-H} \quad (4.10)$$

$$\text{onde: } H = \ln 2 \left(\frac{D}{D_{50}} \right)^S \quad (4.11)$$

e:

D = é a dose recebida;

D_{50} = é a dose que causa o efeito em 50% da população exposta; e

S = é o parâmetro de forma, que caracteriza o coeficiente angular da relação dose risco.

Esses modelos de dose-resposta são baseados em trabalhos da NRC e NRPB(JONES, 1996).

O número total de efeitos na população pode ser calculado pela somatória do produto do risco(calculado em cada ponto da grade) pelo número de indivíduos em cada ponto da grade.

$$R_{total} = \sum_{i=1}^j R_i \times g_p \quad (4.12)$$

onde:

R_i é o risco individual considerado num determinado setor da grade

g_p população no setor da grade

R_{total} é o risco em toda população, nos setores considerados

Os valores de distribuição populacional no setor da grade é o número de indivíduos que habitam em torno do local de liberação, divididos em setores angulares e bandas, conforme explicado na Seção 4.6 deste Capítulo 4 e na Figura 4.3.

4.4- Meteorologia

As doses recebidas por indivíduos expostos a um acidente nuclear são influenciadas pelas condições meteorológicas reinantes durante o acidente como ilustra a Figura 4.1.

Em condições meteorológicas favoráveis (associadas a ventos fortes) o material radioativos se dispersa rapidamente pela atmosfera diminuindo consideravelmente a sua

Tabela 4.3- Efeitos imediatos à saúde (JONES,1996)

Dose nos órgãos/ tecidos				Parâmetros cálculo D ₅₀ média			
Irradiação externa	Irradiação interna	Efeito	Parâmetro de forma S	D.Gy	D ₀ Gy ² /hour	Tempo em que as doses são integradas (dias)	RBE ⁶
		Mortalidade					
Pulmão	Pulmão	Síndrome Pulmonar	7.0	10.0	30.0	1,7,30,365	7.0
Medula óssea	Ossos, (medula óssea)	Síndrome Hematopoiética	6.0	4.5	0.1	1,7,30	2.0
Outros órgãos (2)	--	Síndrome Gastrointestinal	10.0	15.0	0.0	1,7	--
Ovários	Útero	Morte pré e neo-natal	3.0	1.5	0.0	1,30	20.0
Pele	---	Morte devido a queimaduras na pele (4)	--	--	--	--	--
		Efeitos Patológicos					
Pulmões	Pulmões	Disfunção pulmonar	7.0	5.0	15.0	1,7,30,365	7.0
Tireóide	Tireóide	Hipotireoidismo	1.3	60.0	30.0	1,7,30	0.0
Pele	---	Queimaduras na pele	5.0	20.0	5.0	1,7,30	0.0
Olhos (5)	--	Catarata	5.0	3.0	0.01	1,7,30	0.0
Ovários	Útero	Retardo Mental (3)	1.0	1.5	0.0	1,30	20.0

Nota:

1-Em acidentes envolvendo liberações de emissores alfa , a dose absorvida são multiplicadas por um fator que contabiliza a efetividade biológica relativa das emissões alfa agudas.

2-Como os fatores de conversão de dose para o trato gastrointestinal não foram incluídas nos dados de GSF, os cálculos estão baseados na dose para o restante dos órgãos.

3-Os riscos previstos utilizando estes parâmetros devem ser multiplicados por 0.01, para serem aplicáveis à população em geral, permitindo que seja considerada apenas a fração da população total que está grávida naquele momento.

4-O risco de morte devido à queimaduras na pele é calculado assumindo-se que uma fração das pessoas expostas morrerá devido a essas queimaduras.

5-A dose nos olhos é assumida como sendo igual à da pele.

6- RBE é o fator de Efetividade Biológica da Radiação, que varia para diferentes tecidos. Os órgãos têm diferentes sensibilidades para irradiação alta e baixa. Isto está incluído no modelo pela multiplicação da dose LET alta pela Efetividade Biológica Relativa (RBE). Em alguns casos, tais como pele, a RBE é tomada como sendo zero, devido às partículas α emitidas por vários radionuclídeos na pele não penetrarem apenas pelas camadas mortas da pele.

concentração, e conseqüentemente, as doses de radiação a indivíduos expostos. A baixa dispersão atmosférica (associada a ventos fracos) resulta em concentrações maiores e portanto, em doses maiores devido a imersão na pluma e à inalação. A ocorrência de chuvas durante o período de liberação pode levar a uma maior contaminação do solo nas proximidades da instalação devido ao efeito da deposição.

O PC-COSYMA utiliza, para uma distância de até 50km da fonte de liberação, um modelo Gaussiano segmentado para simular a dispersão da pluma radioativa. O modelo permite mudanças horárias na direção e velocidade do vento, categorias de estabilidade atmosférica e índice pluviométrico. O modelo assume que as condições de dispersão da pluma são determinadas por um único conjunto de dados meteorológicos representativos das condições da região. Esses dados são normalmente obtidos por uma estação meteorológica existente no próprio sítio do reator, que gera informações na forma de médias horárias anuais.

A liberação de material radioativo pode ser simulada por longos períodos de tempo, divididos em períodos horários tratados separadamente (segmentação). Cada período horário pode ter a sua própria condição meteorológica, permitindo a simulação de mudanças na direção e velocidade do vento e do índice pluviométrico durante o período total da liberação.

As condições meteorológicas reinantes durante o acidente podem ser escolhidas pelo usuário, caso em que se usa a opção determinística disponível no PC-COSYMA. No caso da opção probabilística, o código possui esquemas próprios de amostragem para definir as sequências horárias das condições meteorológicas, permitindo a avaliação dos riscos associados à população ou dos riscos em pontos de interesse.

A dose recebida por inalação ou imersão na pluma radioativa é função da concentração integrada no tempo $\chi_T(x, y, z)$, no ponto de interesse, dada em Bq.s/m³.

No modelo Gaussiano χ_T é dada por:

$$\chi_T(x, y, z) = \frac{Q_0}{2\pi\sigma_{y,eff}\sigma_{z,eff}U_T} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{y,eff}^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_{z,eff}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_{z,eff}^2}\right) \right\} \Delta t_n \quad (4.13)$$

onde:

x, y, z – coordenadas cartesianas com origem abaixo da fonte de liberação no solo;

Q_0 - Quantidade de material liberado pela fonte (Bq);

U_T - Velocidade do vento em m/s; na altura de liberação H, m durante o intervalo de tempo t ;

H - Altura efetiva de liberação, em m;

σ_y e σ_z = Desvios padrão vertical e horizontal na pluma;

χ_T = Concentração Integrada no tempo em Bq.s/m³;

Os parâmetros de distribuição σ_y e σ_z podem ser escritos na forma:

$$\sigma_y = p_y x^{q_y} \quad \sigma_z = p_z x^{q_z} \quad (4.14)$$

p_y, p_z, q_y e q_z são os coeficientes de difusão, que são determinados experimentalmente e dependem da estabilidade atmosférica, tipo de superfície e altura de liberação. Na versão utilizada no presente trabalho utilizam-se os valores apresentados na Tabela 4.4.

O PC-COSYMA considera a altura da chaminé e a elevação da pluma ("plume rise"). Também considera-se o efeito "building wake", para liberações efetuadas ao nível do solo. As concentrações de material radioativo são calculadas considerando-se o decaimento radioativo durante a passagem da pluma. O modelo de dispersão usado pelo PC-COSYMA é descrito em (PANITZ et al., 1989).

4.5- Deposição do material radioativo

A deposição do material radioativo é responsável pela dose externa γ do material depositado no solo e pela dose β do material depositado na pele e roupas conforme mencionado no item 4.2 deste capítulo

O PC-COSYMA considera deposição seca e úmida e faz distinção nas propriedades de deposição para quatro grupos de radionuclídeos: gases nobres, que não se depositam; aerossóis, lodo elementar e lodo orgânico na forma de Iodeto de Metila. O lodo na forma de aerossol é assumido comportar-se como os outros aerossóis.

4.5.1- O modelo de deposição

4.5.1- Deposição a seco

A deposição por via seca ocorre por sedimentação (via gravidade) ou pelo impacto de obstáculos próximos à superfície do solo. A sedimentação não é um processo de remoção importante para aerossóis ou partículas menores que 15μ , pois a velocidade de queda é menor em comparação com a componente vertical resultante da turbulência e movimento médio do ar.

A velocidade de deposição é a relação do fluxo de deposição dividido pela concentração a uma dada distância particular.

$$\chi_D(x, y) = v_D \times C_{AR} \quad (4.15)$$

onde,

Tabela 4.4 – Coeficientes de dispersão (PANITZ et al., 1989).

Altura (m)	Categoria Estabilidade	Coeficientes de Difusão			
		p_y	q_y	p_z	q_z
69	A	0.946	0.796	1.321	0.711
	B	0.826	0.796	0.950	0.711
	C	0.586	0.796	0.700	0.711
	D	0.418	0.796	0.520	0.711
	E	0.297	0.796	0.382	0.711
	F	0.235	0.796	0.311	0.711

Onde as Categorias de Estabilidade são definidas conforme segue:

Notação Pasquill-Gifford	Descrição da estabilidade
A	Muito Instável
B	Moderadamente Instável
C	Levemente Instável
D	Neutra
E	Moderadamente estável
F	Muito estável

χ_D = Concentração de material depositado no solo ($\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$), devido à deposição seca;

v_D - Velocidade de deposição (m/s); e

C_{AR} = Concentração atmosférica próxima ao solo (Bq/m^3)

Os valores típicos de v_D estão apresentados na Tabela 4.5.

No presente trabalho adotou-se os valores para superfícies com plantações agrícolas, que caracterizam os arredores do sítio.

Para calcular a contaminação no solo devido à deposição a seco pela equação 4.15, os valores das velocidades de deposição devem ser corrigidos pelos fatores apresentados na Tabela 4.6.

A depleção da pluma devido à deposição a seco do material é simulada pela utilização do modelo de depleção da fonte ("source depletion model"), no qual é assumido que o material depositado é removido a partir do volume total da nuvem, e não somente a partir da camada superficial.

4.5.2- Deposição úmida

O mecanismo que contribui para a deposição úmida no solo é a remoção úmida ("washout"). Este mecanismo descreve a contaminação do solo por chuvas, nuvem e granizo formados acima e caindo através da nuvem, coletando aerossóis e gases solúveis ou vapores. A depleção da fonte é calculada considerando a fração de material que permanece na nuvem (f_w):

$$f_w = \exp\left(-\frac{\lambda}{u} x\right) \quad (4.16)$$

Tabela 4.5 – Velocidades de Deposição Típicas (PANITZ, 1989).

Superfície	Aerossol (1 μ m)	Iodetos	
		Elementar	Orgânico
Superfícies lisas, inclusive ruas	2.E-4	2.E-3	5.E-4
Superfícies agrícolas	1.E-3	1.E-2	5.E-4
Florestas	1.E-2	1.E-2	5.E-4
Valores médios	3.E-3	1.E-2	5.E-4

Tabela 4.6 – Parâmetros de deposição e fatores de correção utilizados no presente trabalho. (PANITZ, 1989).

Tipo de Radionuclídeo	v_D (m/s)	Fatores de Correção ⁽¹⁾
Gases Nobres	0	1.0
Aerossóis	3.E-3	3.33 E-1
Iodo Elementar	1.E-2	1.0
Iodo Orgânico	5.E-4	1.0
Iodetos Particulados	3.E-3	3.33 E-1

(1) Fator que considera a presença de áreas agrícolas e urbanas.

Onde:

λ = Coeficiente de remoção úmida ("washout") em s^{-1} ;

u = velocidade do vento (m/s) na altura de liberação;

x = distância a partir da fonte de liberação, na direção do vento, em m.

O coeficiente de remoção úmida, descreve a precipitação e a taxa de deposição no solo. No PC-COSYMA λ pode ser definido como uma função:

$$\lambda = a \cdot I^b \quad (4.17)$$

Onde:

I = Taxa de precipitação pluviométrica, em mm/h; e

a e b = constantes, cujos valores estão na Tabela 4.7.

A concentração de atividade no solo induzida pela deposição úmida (χ_w), considerando λ constante, é dada por:

$$\chi_w = \frac{\lambda Q_0}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (4.18)$$

Com:

χ_w = Atividade no solo induzida por deposição úmida ($Bq.m^2/s$);

Caso seja necessário contabilizar a duração da precipitação, então a fração de material que permanece na nuvem (f_w) é dada por:

$$f_w = \exp(-\lambda t) \quad (4.19)$$

Tabela 4.7 – Coeficientes e expoentes para determinação do coeficiente λ

Radionuclídeo	Coeficiente a	Coeficiente b
Gases Nobres	0.0	0.0
Aerossóis	8.E-5	0,8
Iodeto Elementar	8.E-5	0,6
Iodeto Orgânico	8.E-5	0,6
Iodeto Particulado	8.E-5	0,8

Finalmente, para que se possa calcular a atividade de radionuclídeos depositados no solo (χ_{GR}), deve-se somar a atividade induzida tanto pela deposição úmida como pela seca:

$$\chi_{GR} = \chi_W + \chi_D \quad (4.20)$$

Onde:

χ_W = Atividade no solo induzida por deposição úmida (Bq.m²/s);

χ_D = Atividade no solo induzida por deposição seca (Bq.m²/s);

4.6- Distribuição Populacional

A avaliação de doses e riscos coletivos exige o conhecimento da distribuição populacional ao redor do sítio, como ilustra a expressão 4.11.

O PC-COSYMA trata essa distribuição por intermédio de uma grade, ilustrada na Figura 4.3. São definidos setores angulares e bandas concêntricas, que delimitam áreas onde a população é distribuída uniformemente. Os setores são numerados, sendo que ao de número 1 corresponde a direção Norte, e as bandas também são numeradas, sendo que a de número 1 está centrada no local onde ocorre a liberação.

O modelo sempre considera os valores médios internos ao setores como o ponto de cálculo das doses e riscos.

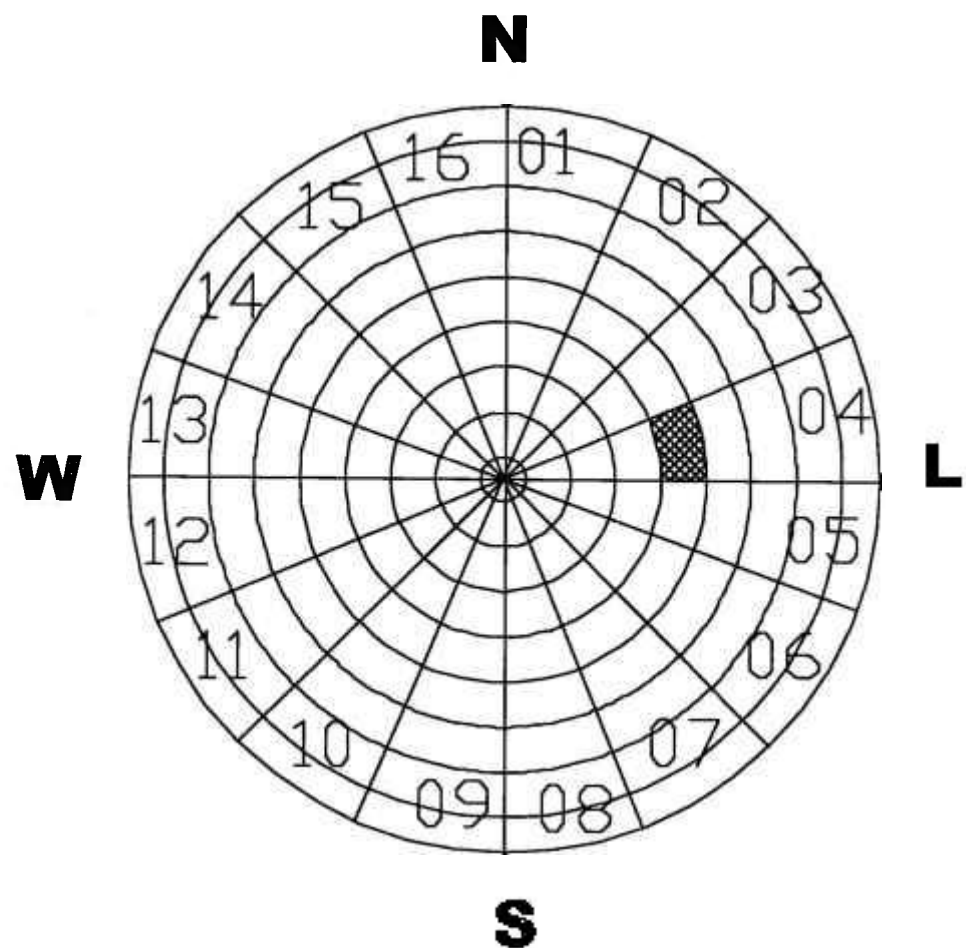


Figura 4.3 - Exemplo de uma Grade de Distribuição Populacional, com 16 setores angulares e 8 bandas:

4.7- Medidas de Proteção

4.7.1- Ações de Proteção

Na ocorrência de uma liberação não controlada de material radioativo para o meio ambiente a população deve ser protegida contra as possíveis consequências dessa liberação por medidas planejadas de intervenção. A intervenção visa prevenir/diminuir a ocorrência de efeitos imediatos à saúde (mortes imediatas e efeitos patológicos) e reduzir o risco de efeitos crônicos (câncer ou efeitos genéticos).

As Ações de Proteção são identificadas pelas seguintes fases principais:

- Fase Inicial ou de Emergência;
- Fase Intermediária; e
- Fase Final

A Fase Inicial ou de Emergência, é o período em que são necessárias decisões/ações logo após a ocorrência do acidente. A duração dessa fase é da ordem de minutos a dias.

A Fase Intermediária corresponde ao período que se inicia quando já se tem o controle de liberação e se dispõem de valores de contaminação ambiental, que permitem identificar a necessidade de ações adicionais de proteção. A duração dessa fase é da ordem de horas a dias.

A Fase Final inicia-se com as ações destinadas a reduzir os riscos de radiação no ambiente e termina quando essas ações são completadas. A duração dessa fase é da ordem de meses a anos.

Na Tabela 4.8 estão apresentadas as ações de proteção para os vários caminhos de exposição, durante as três fases.

As ações consideradas nesta tabela são:

- Abrigagem: permanência dos indivíduos dentro de suas casas;
- Evacuação: retirada das pessoas da área em questão;
- Controle de acesso: consiste em restringir o acesso às áreas afetadas para evitar que pessoas não autorizadas sofram os efeitos da dose;
- Fornecimento de tabletes de lodo estável: consiste no fornecimento de tabletes de lodo estável, para impedir a absorção, pela Tireóide, dos lodetos radioativos (I-131, I135, I-134);
- Equipamento Respiratório Padrão: utilização de máscaras respiratórias para evitar a inalação de aerossóis.
- Descontaminação dos Indivíduos: retirada dos radionuclídeos da pele e das roupas dos indivíduos afetados;
- Realocação : mudança dos indivíduos, de suas atuais moradias, para outros locais, até que a contaminação seja removida;
- Descontaminação de terras e propriedades: etapa em que se remove os radionuclídeos depositados no solo.
- Controle de água e alimentos: consiste na monitoração e controle dos alimentos e da água, produzida tanto na região como nos arredores do local da liberação, para evitar que os mesmo possam contaminar as pessoas.

Na Tabela.4.9 estão identificadas as faixas de dose para níveis de intervenção primários, para a Fase Inicial ou de Emergência.

Conforme apresentado no Safety Series 72 (AGÊNCIA INTERNACIONAL, 1985),

TABELA 4.8 – Caminhos de exposição, fases do incidente nuclear e ações de proteção.

Caminhos de exposição potencial	Fases do Acidente	Ações potenciais de proteção
1. Radiação externa a partir da instalação	IMEDIATA	Abrigagem
		Evacuação
		Controle de Acesso
		Abrigagem
2. Radiação externa a partir da pluma	IMEDIATA	Evacuação
		Controle de Acesso
		Abrigagem
		Uso de Iodeto de Potássio
3. Inalação da atividade da pluma	IMEDIATA	Equipamento padrão respiratório de proteção
		Evacuação
		Controle de Acesso
		Abrigagem
4. Contaminação da pele e roupas	INTERMEDIÁRIA	Evacuação
		Descontaminação dos indivíduos
		Realocação
		Descontaminação da terra e propriedades
5. Radiação externa a partir de depósitos no solo	INTERMEDIÁRIA	Evacuação
		Realocação
		Descontaminação da terra e propriedades
		Controle de água e alimentos
6. Ingestão de alimentos e água contaminados	FINAL	Relocação
		Descontaminação da terra e propriedades
7. Inalação de atividade ressuspensa	FINAL	

Nota: O uso de alimento animal estocado e água não contaminada, até o limite de ingestão de radionuclídeos por animais domésticos, na cadeia alimentar, pode ser aplicável em qualquer fase.

os valores limites de contaminação do solo devem ser menores que os apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.9- Níveis de intervenção primários para a Fase Inicial ou de Emergência (AGÊNCIA INTERNACIONAL,1985).

Público em geral				
Medidas de Proteção	Dose de Corpo Inteiro ou Dose Efetiva Equivalente (mSv)		Dose na Tireóide (mSv)	
	Nível Inferior	Nível Superior	Nível Inferior	Nível Superior
Fase Inicial				
Abrigagem	5	50	50	500
Tabletes de Iodo	---	---	50	500
Evacuação	50	500	500	5000

Tabela 4.10- Limites da Concentração de radionuclídeos no solo (AGÊNCIA INTERNACIONAL,1985)

Radionuclídeo	Concentração máxima no solo (*)
I-131	$3 \times 10^8 \text{ Bq/m}^2$
Cs-137	$4 \times 10^8 \text{ Bq/m}^2$
Cs-134	$7 \times 10^7 \text{ Bq/m}^2$
Pu-239	$8 \times 10^{11} \text{ Bq/m}^2$

Nota: Níveis derivados de intervenção, para evacuação, considerando a dose externa gama a curto prazo, a partir do radionuclídeo depositado no solo.

Capítulo 5 - APLICAÇÃO A UM REATOR PWR DE PEQUENO PORTE

5.1- Características Principais do Reator

Neste capítulo é feita uma análise da utilização de um Sistema de Alívio com Filtros da Contenção para um reator tipo PWR de pequeno porte. O reator analisado possui uma potência térmica de 50MW(t), localizado em área rural, mas próxima a um centro populacional. Supõe-se, adicionalmente, que se conheça as características meteorológicas do local, dadas na forma de médias horárias anuais, de modo a possibilitar a avaliação das consequências externas.

O reator em estudo possui todos os sistemas normalmente encontrados em reatores PWR de grande porte (contenção nuclear, sistemas de refrigeração normal e de emergência, etc...). Assim sendo, assume-se que os cenários acidentais do reator em estudo sejam semelhantes aos de um reator de grande porte.

5.1.1 – Inventário Radioativo

O inventário do reator típico foi calculado utilizando o código Origen-2 (CROFF,1980), tomando por base as seguintes características principais:

- Tempo total de operação de 1120 dias de irradiação a potência média de 30% da potência total;
- O ciclo operativo considerado foi: 63 dias operando e 28 dias parado entre os ciclos, perfazendo 12 ciclos no total;

- O núcleo possui 21 elementos; sendo que cada elemento é constituído de 260 varetas arranjadas em 17x17 e tendo 29 tubos guia entre elas;
- O comprimento total das varetas é de 0,987m;
- A densidade de vazios na pastilha é de 2%;
- O diâmetro da vareta é 8,49mm; e
- A densidade de potência média utilizada foi de 16,29 kW/kg.

A Tabela 5.1 apresenta o inventário de radionuclídeos presentes no núcleo, após 1120 dias de operação a uma potência média de 30%.

5.2- Caracterização do Termo Fonte

5.2.1- Termo Fonte na Contenção

Para os casos aqui estudados foram considerados os termos fonte correspondentes a acidentes severos, utilizando para isto os dados apresentados na Tabela 3.6. Note-se que as frações liberadas referem-se ao inventário apresentado na Tabela 5.1.

5.2.2- Termo Fonte para o Ambiente

Conforme visto no Capítulo 2, os Sistemas de Filtros e Alívio da Contenção, são projetados para reter parte do termo fonte liberado para a contenção .

No relatório SAND94-2157 (ANG et al, 1994) são fornecidos os termos fonte para o ambiente, para reatores tipo PWR, que utilizam Sistemas de Alívio da Contenção.

Tabela 5.1- Inventário do núcleo , para 1120 dias de operação e potência média de 30%.

	Meia Vida Radiológica (dias)	Inventário do núcleo (Bq)
Kr-85m	1.9E-1	5.528E+15
Kr-85	3.9E+3	2.600E+13
Kr-87	5.3E-2	1.115E+16
Kr-88	1.2E-1	1.575E+16
Sr-89	5.1E+1	1.549E+16
Sr-90	1.0E+4	2.031E+14
Sr-91	4.0E-1	2.538E+16
Y-91	5.8E+1	1.785E+16
Mo-99	2.8E+0	2.665E+16
Tc-99m	2.5E-1	2.334E+16
Ru-103	3.9E+1	1.183E+16
Ru-106	3.7E+2	5.039E+14
Sb-127	3.8E+0	8.850E+14
Sb-129	1.8E-1	3.311E+15
Te-129m	3.4E+1	4.037E+14
Te-131m	1.2E+0	1.652E+15
Te-132	3.3E+0	1.925E+16
I-131	8.0E+0	1.295E+16
I-132	9.6E-2	1.936E+16
I-133	8.7E-1	2.993E+16
I-134	3.7E-2	3.374E+16
I-135	2.8E-1	2.787E+16
Xe-131m	1.2E+1	1.363E+14
Xe-133	5.2E+0	2.994E+16
Xe-133m	2.2E+0	8.776E+14
Xe-135	3.8E-1	2.154E+16
Xe-138	9.8E-3	2.749E+16
Cs-134	7.5E+2	6.057E+12
Cs-136	1.3E+1	5.269E+13
Cs-137	1.1E+4	2.153E+14
Ba-140	1.3E+1	2.667E+16
La-140	1.7E+0	2.673E+16
Ce-144	2.8E+2	6.101E+15
Pm-147	9.6E+2	7.600E+14
Eu-155	1.8E+3	8.318E+12
Po-210	1.4E+2	8.873E-05
Np-239	2.4E+0	1.836E+17
Pu-238	3.2E+4	1.520E+10
Pu-239	3.2E+4	1.722E+12
Am-241	1.6E+5	9.701E+07
Cm-242	1.6E+2	6.741E+09
Cm-243	1.0E+4	3.269E+03
Cm-244	6.6E+	9.909E+03

Esses valores são utilizados na Alemanha e estão listados na Tabela 5.2. A primeira coluna representa um termo fonte aproximado, para a perda precoce da contenção, e os valores estão compatíveis com os da Tabela 3.6, no Capítulo 3. Na segunda coluna estão os valores para um acidente severo com a presença de Sistemas de Alívio com Filtros.

Como na Tabela 3.6 não estão presentes todos grupos de radionuclídeos necessários à avaliação de consequências, utilizam-se os valores sugeridos por (DILLMANN & BUNZ, 1991) para os filtros da Figura 2.8 e 2.9, também de origem alemã. A eficiência dos Filtros para lodetos foi adotada a partir de testes, com estes mesmos tipos de filtros, apresentados por (ECKARDT et al., 1997b). A eficiência dos filtros é apresentada na Tabela 5.3.

No presente estudo são utilizados os valores sugeridos por ANG et al. (1994) e complementados com os valores de eficiência de aerossóis dados por DILLMANN & BUNZ (1991). Na Tabela 5.4 são listadas as frações de liberação com e sem a utilização do Sistema de Filtros e Alívio da Contenção, para os grupos de radionuclídeos, definidos anteriormente na Seção 3.5 do Capítulo 3. Nesta Tabela considerou-se que as frações liberadas para os Grupos 6, 7 e 8 são as referentes aos Aerossóis em geral, correspondentes aos valores da Tabela 5.3. Já as frações liberadas, para os radionuclídeos do grupo 3, são baseadas nos dados de eficiência para o MnO , que é de 99,9999% (Vide Tabela 5.3).

No trabalho de SCHOLTEN et al. (1993), os valores utilizados para quantificar os tipos de lodo liberados são:

38% do lodo está na forma elementar;

2% do lodo está na forma orgânica (CH_3I) ; e

60% está na forma de aerossóis.

Tabela 5.2 – Termos Fonte para o ambiente para acidentes em Reatores tipo PWR, na Alemanha (ANG et al., 1994)

Grupo de Radionuclídeos	Acidente com perda precoce da Contenção	Acidente com a presença do Sistema de Alívio da Contenção
Xe, Kr	100	90
Césio	>50	3E-5
Telúrio	>50	4E-4
Estrôncio	40	2E-5
Início da Liberação (h)	>2	>96

Tabela 5.3 – Eficiência dos Sistema de Filtros com malha de aço utilizados na Alemanha (DILLMANN & BUNZ, 1991)

Tipo de material testado	Eficiência	Observação
Aerossol Urânio ϕ partícula ~ 15 μ m	$\geq 99,99\%$	
MnO e CsOH	99,9999%	
Aerossóis em geral	99,97%	Vazão = 9333m ³ /h
DOP	99,998%	

Eficiência dos Sistema de Filtros com malha de aço, utilizados na Alemanha, para Iodetos (ECKARDT et al., 1997b).

Iodetos	99,5 (mín)	
---------	------------	--

Tabela 5.4 – Frações de Liberação dos Radionuclídeos.

Grupos	Título	Frações Liberadas sem sistema de Filtros	Frações Liberadas com sistema de Filtros
01	Gases Nobres	1,0	1,0
02	Halogêneos	0,6	5E-3
03	Metais Alcalinos	0,66	1E-5
04	Grupo Telúrio	0,305	4E-4
05	Estrôncio, Bário	0,12	2E-5
06	Metais Nobres	0,005	3E-4
07	Lantanídeos	0,0052	3E-4
08	Grupo Cério	0,0055	3E-4

As frações liberadas são frações do inventário do núcleo.

O mesmo estudo analisou o efeito das espécies de lodetos nas liberações. Como a eficiência do filtro para lodetos, estabelecida na Tabela 5.3 é de no mínimo 99.5%, espera-se então uma grande sensibilidade à esta composição, o que efetivamente ocorreu no estudo de SCHOLTEN et al.(1993).Mas ocorre que também não se conhece qual a proporção exata das formas de lodetos, no tempo exato da liberação. Este mesmo trabalho mostra que estas percentagens são imprecisas mas que por falta de outros dados elas serão utilizadas no presente trabalho.

As consequências radiológicas são avaliadas tendo como referência os valores definidos nas Tabelas 4.9 e 4.10. Para a avaliação de doses adotou-se o nível inferior de abrigagem que é 5 mSv. As contaminações do solo são estudadas para os radionuclídeos I-131, Cs-137, Cs-134 e Pu-239.

5.3- Características do Local

5.3.1 – Meteorologia

Os dados meteorológicos utilizados nas simulações foram extraídos do Relatório interno do IPEN (LESLIE, 1997). Esses dados representam médias horárias anuais de uma região no interior paulista e foram obtidos a partir de uma torre meteorológica local. Os dados contém a velocidade e a direção do vento, categoria de estabilidade atmosférica e altura da camada de mistura. A Tabela 5.5 mostra um extrato do arquivo de dados meteorológicos usado nas simulações.

5.3.2 - Características Topográficas

A topografia em torno da área do sítio , da estação meteorológica, é caracterizada por altitudes médias entre 550 e 600m acima do nível médio do mar, entretanto, são

Tabela 5.5 – Extrato do arquivo de dados meteorológicos.

Direção do vento ⁽¹⁾	Categoria de Estabilidade ⁽²⁾	Taxa de precipitação pluviométrica ⁽³⁾	Velocidade do vento (m/s) x 100	Altura da Camada de mistura
135	7	20	0	100
135	6	20	100	100
135	6	20	100	100
135	6	20	100	100
135	6	20	100	100
135	6	20	100	100
135	5	20	0	175
135	1	20	0	250
17	1	20	50	325
99	1	20	60	400
99	1	20	0	400
237	1	20	170	400
218	1	20	50	1200
161	1	20	120	1200
321	2	20	130	1200
191	2	20	90	1200
194	5	20	60	650
168	4	20	310	100
171	4	20	230	100
140	5	20	100	100
143	6	20	110	100
139	6	20	80	100
139	6	20	0	100
139	7	20	0	100
139	6	20	0	100
196	6	20	100	100
196	7	20	0	100
196	7	20	0	100
196	6	20	0	100
196	6	20	0	100

Notas:

(1) Direção do vento está em graus, no sentido horário a partir do Norte;

(2) A Categoria de Estabilidade é representada pelo número 1 para Categoria A, número 2 para Categoria B, número 3 para Categoria C, número 4 para Categoria D, número 5 para Categoria E e número 6 para Categoria F;

(3) Nesta coluna é apresentado o produto da Taxa de Precipitação pluviométrica em mm/h x 100;

(4) Nesta coluna é apresentado o produto da velocidade do vento (m/s) x100. A medida das velocidades do vento foram efetuadas a 10m de altura.

observadas elevações que chegam a atingir em alguns pontos até 970m de altitude em uma formação serrana próxima localizada a aproximadamente 6km a Sudoeste do sítio.

As características levemente acidentadas da topografia regional podem influenciar o fluxo de ar a partir das condições meteorológicas locais. Esse fato é particularmente importante sob a influência do anticiclone polar, quando os padrões de circulação de mesoescala caracterizam a maior ou menor capacidade de dispersão dos efluentes liberados para a atmosfera em condições normais de operação ou de acidentes.

A partir desses dados utilizou-se no código PC-COSYMA, como dado de entrada a opção de terreno acidentado.

5.3.3-Distribuição Populacional

A distribuição populacional compreende a população existente em torno de um raio de 80km a partir da estação meteorológica.

A área em torno do sítio , num raio de 80km, foi subdividida em 16 setores de 22.5° , e 13 faixas concêntricas, com o reator locado no centro desses círculos concêntricos. As distâncias dos arcos externos das faixas concêntricas, a partir do centro foram 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 km, respectivamente. Para numerar os setores foi utilizado o sentido horário sendo o setor número 01 o mais a leste. A Figura 5.1 mostra um esquema dos setores.

As informações sobre a distribuição populacional foram obtidas a partir de dados informados pelo IBGE(1991) e são dados estimados para o ano 2000. Estas informações estão mostradas nas Figuras 5.2, para distância de até 10km do sítio e na Figura 5.3, para até 80km de distância do sítio.

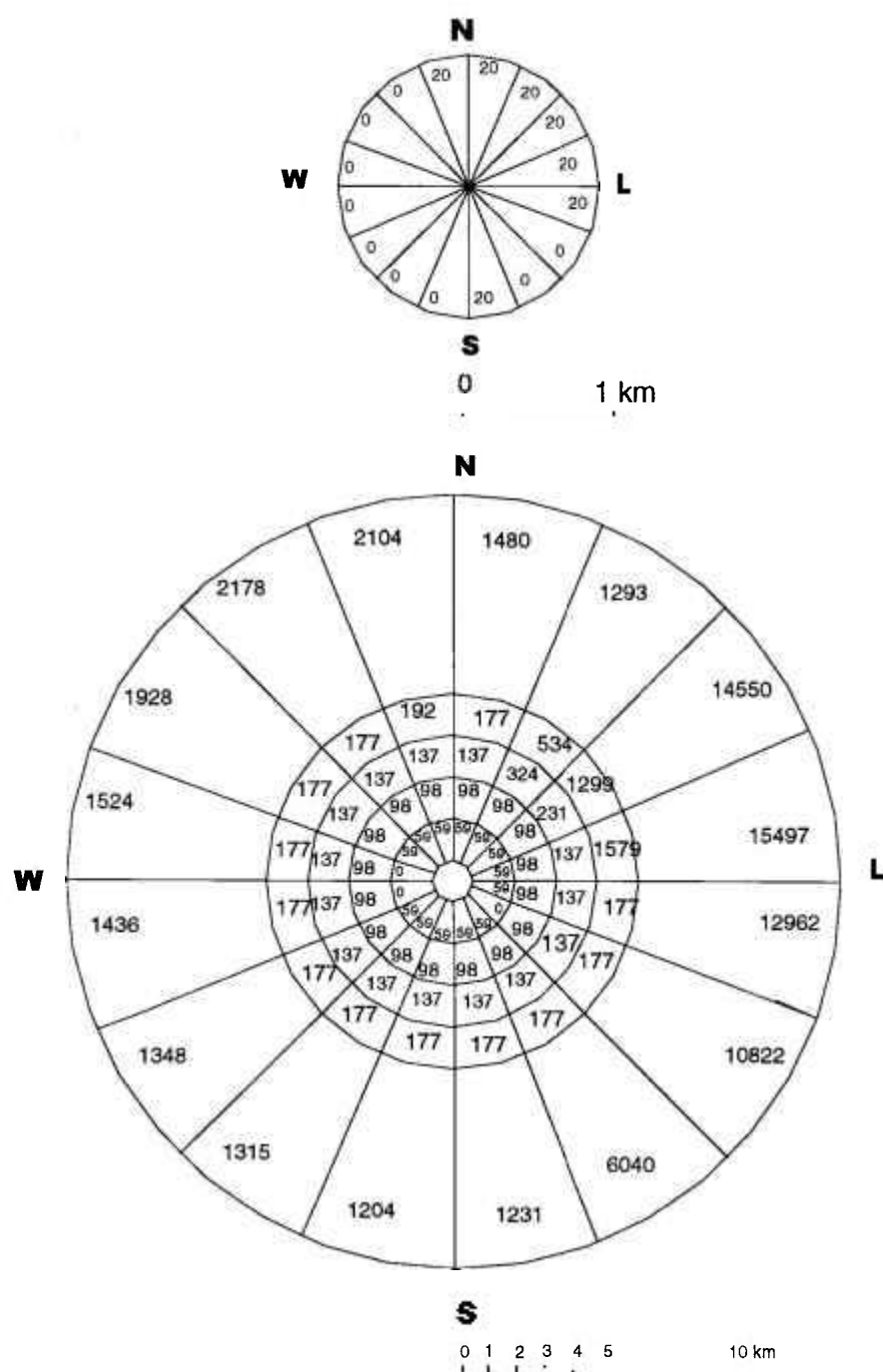


Figura 5.1- Distribuição populacional para um raio de até 10km de distância a partir do sítio (IBGE, 1991).

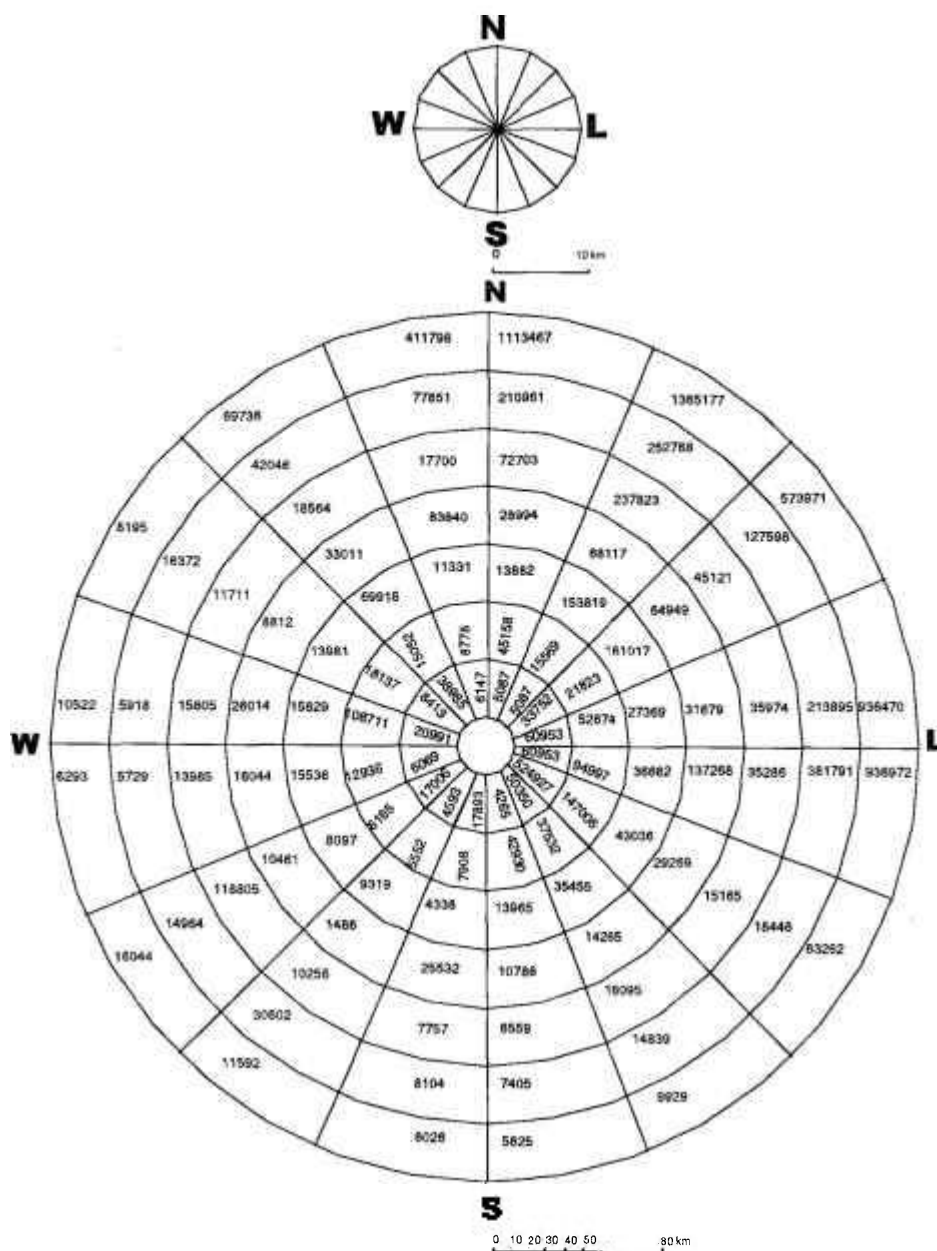


Figura 5.2- Distribuição populacional para um raio de até 80km de distância a partir do sítio (IBGE, 1991).

5.4-Resultados

A influência do Sistema de Alívio na diminuição das consequências radiológicas externas foi avaliada simulando-se com o código PC-COSYMA vários casos, sob diferentes condições de liberação para o meio ambiente.

Assumiu-se a ocorrência de um acidente severo , com acentuada degradação do núcleo, conforme descrito no Capítulo 3.

Os casos analisados foram reunidos em quatro grupos principais. No primeiro grupo variou-se o tempo (T_i) decorrido após o desligamento do reator, para o início da liberação para o meio ambiente ($T_i=4h$, $24h$ e $168h$). Foram mantidos constantes os demais parâmetros (altura da chaminé = $70m$, período de integração da dose imediata = 1 dia, número de fases de liberação = 4 fases).

No segundo grupo foi analisada a influência da altura da chaminé ($h=70m$, $100m$ e $120m$). No grupo variou-se o tempo de integração de dose ($t_d = 1dia$, 7 dias e 24 dias). No quarto grupo variou-se o número de fases de liberação (2, 4 e 6 fases).

Todos os casos foram analisados com e sem a presença dos Filtros. Em todos os casos foram desconsideradas a existência de contramedidas de emergência, no cálculo das consequências radiológicas. A Tabela 5.6 descreve as principais características dos casos analisados.

Os casos acompanhados da letra “a” não incluem o uso de Filtros e as frações de liberação estão apresentadas na Tabela 5.4 (na coluna sem Filtros). Os casos com o uso de Filtros, estão acompanhados da letra “b” e as frações de liberação estão na Tabela 5.4, coluna com Filtros.

Tabela 5.6 – Dados de entrada para os Casos Analisados

Grupo	Casos	Ti^(1,2)	H⁽⁴⁾	NF⁽⁵⁾	PID⁽⁶⁾
1	Ia	4h	70	4	1
	Ib	4h	70	4	1
	IIa	24h	70	4	1
	IIb	24h	70	4	1
	IIIa	168h	70	4	1
	IIIb	168h	70	4	1
2	IIa	24h	70	4	1
	IIb	24h	70	4	1
	Iva	24h	100	4	1
	Ivb	24h	100	4	1
	Va	24h	120	4	1
	Vb	24h	120	4	1
3	VIIIa	24h	70	2	1
	VIIIb	24h	70	2	1
	IIa	24h	70	4	1
	IIb	24h	70	4	1
	IXa	24h	70	6	1
	IXb	24h	70	6	1
4	IIa	24h	70	4	1
	IIb	24h	70	4	1
	Via	24h	70	4	7
	Vib	24h	70	4	7
	VIIa	24h	70	4	24
	VIIb	24h	70	4	24

Notas:

- 1- Ti = Tempo antes do início da liberação
- 2- Após o desligamento do reator.
- 3- As frações de liberação de cada grupo, foram divididas igualmente para cada fase.
- 4- Altura da chaminé (m)
- 5- Número de Fases de Liberação
- 6- Período Integração Dose Imediata (dias)

Em todos os casos, utilizou-se o Inventário do reator conforme o apresentado na Tabela 5.1 e o modelo utilizado foi probabilístico, com amostragem cíclica na simulação das condições meteorológicas.

Os parâmetros de deposição são constantes e seus valores são listados na Tabela 4.10.

5.4.1- Discussão dos resultados.

5.4.1.1- Grupo 1

No Grupo 1 é analisada a influência do tempo (T_i) decorrido após o desligamento do reator até o início da liberação para o meio ambiente.

A Figura 5.3 mostra a curva de concentração média de I-131, no solo, em função da distância da fonte de liberação (Casos Ia, Ib, IIa, IIb, IIIa e IIIb). Observa-se que, em todos os casos analisados a concentração média de I-131 não ultrapassa o limite de $3 \times 10^8 \text{ Bq/m}^2$. Nota-se uma acentuada redução na concentração de lodo devido aos filtros (aproximadamente 100 vezes).

Como os valores de concentração apresentados são médios, não refletem as concentrações nas várias direções à mesma distância do centro. Por isso utiliza-se a Ccdf (probabilidade de que o valor limite de concentração no solo seja ultrapassado) para uma determinada área (a partir do ponto de liberação de radionuclídeos). A curva Ccdf (Probabilidade de que a concentração de I-131 no solo seja maior que $3 \times 10^8 \text{ Bq/m}^2$) vs Área (km^2), Figura 5.4, indica que nas proximidades do ponto de liberação existe a possibilidade do limite de deposição ser ultrapassado. A probabilidade cai para valores

inferiores a 2×10^{-3} , para valores de área maiores que 2 km^2 , ou seja num raio de aproximadamente 1,6 km, centrado nos pontos de liberação.

As concentrações médias de Cs-137 e Cs-134 no solo (Figuras 5.5 e 5.6) exibem o mesmo comportamento. Observa-se também uma acentuada redução nas concentrações no solo para os casos com filtro (10^4 para o Cs-134 e $\sim 5 \times 10^4$ para o Cs-137).

Para o Plutônio as concentrações médias no solo estão muito abaixo do valor limite indicados como limites na Tabela 4.10, mesmo sem os filtros.

A Figura 5.7 mostra a curva de dose efetiva (Sv), ao nível do solo, em função da distância ao ponto de liberação (Casos Ia, Ib, IIa, IIb, IIIa e IIIb). O limite inferior para abrigo (5 mSv) é atingido a distâncias muito próximas ao ponto de liberação e sem a utilização de Filtros.

A curva Ccdf para a dose efetiva média (Figura 5.8) ilustra a influência do tempo T_i para os valores de dose média efetiva, sem filtros. Para $T_i > 24 \text{ h}$, mesmo sem filtros, a probabilidade da dose média efetiva atingir valores maiores que o limite cai para valores inferiores a 1×10^{-3} , para distâncias superiores a aproximadamente 3,5 km. Para $T_i = 4 \text{ h}$, a probabilidade é de 1×10^{-2} para esta mesma distância. Com o uso de Filtros a probabilidade de se atingir o limite cai a valores menores que 10^{-5} .

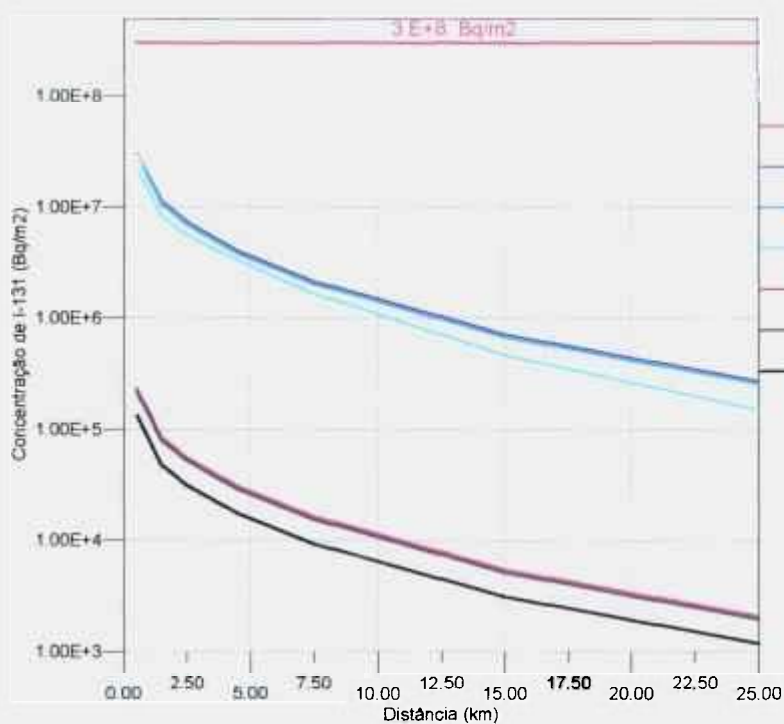


Figura 5.3 - Concentração média de I-131 (Bq/m²) no solo vs Distância (km)
H=70m; NF=4 e PID=1dia

- Limite para não ocorrer evacuação=3 E+8 Bq/m²
- Ti=4h e SEM FILTROS
- Ti=24h e SEM FILTROS
- Ti=168h e SEM FILTROS
- Ti=4h e COM FILTROS
- Ti=24h e COM FILTROS
- Ti=168h e COM FILTROS

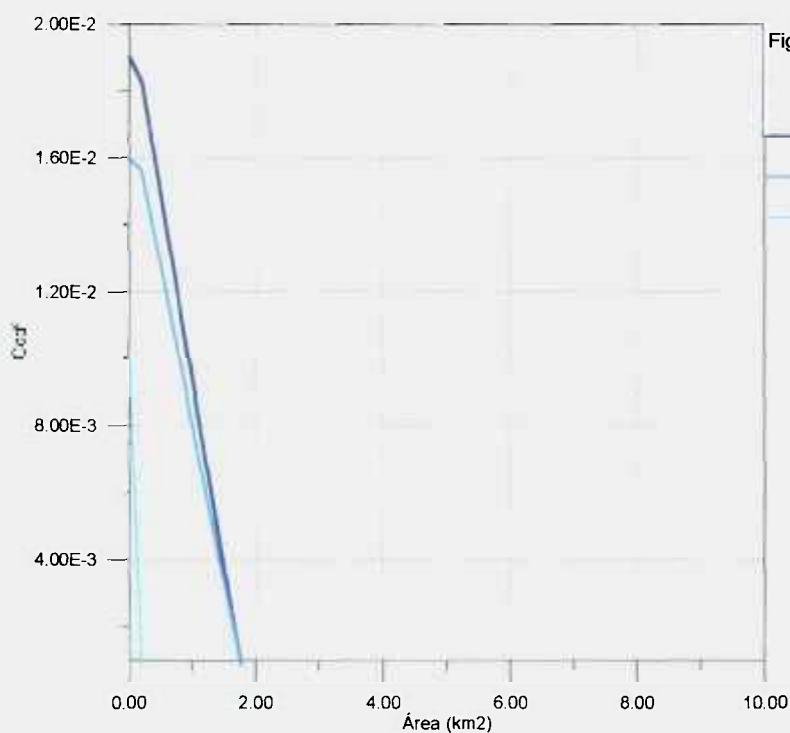


Figura 5.4 - Ccdf para Concentração de I-131 no solo >3 E+8 Bq/m² vs Área (km²)
H=70m; NF=4 e PID=1dia

- Ti = 4h, SEM filtro
- Ti = 24h, SEM filtro
- Ti = 168h, SEM filtro

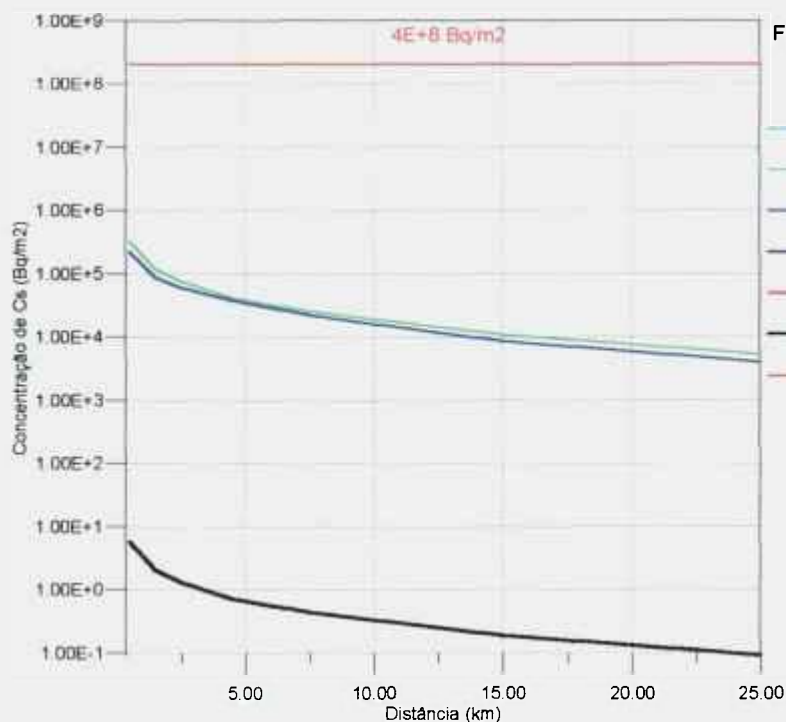


Figura 5.5 - Concentração média de Cs-137 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)
H=70m; NF=4 e PID=1dia

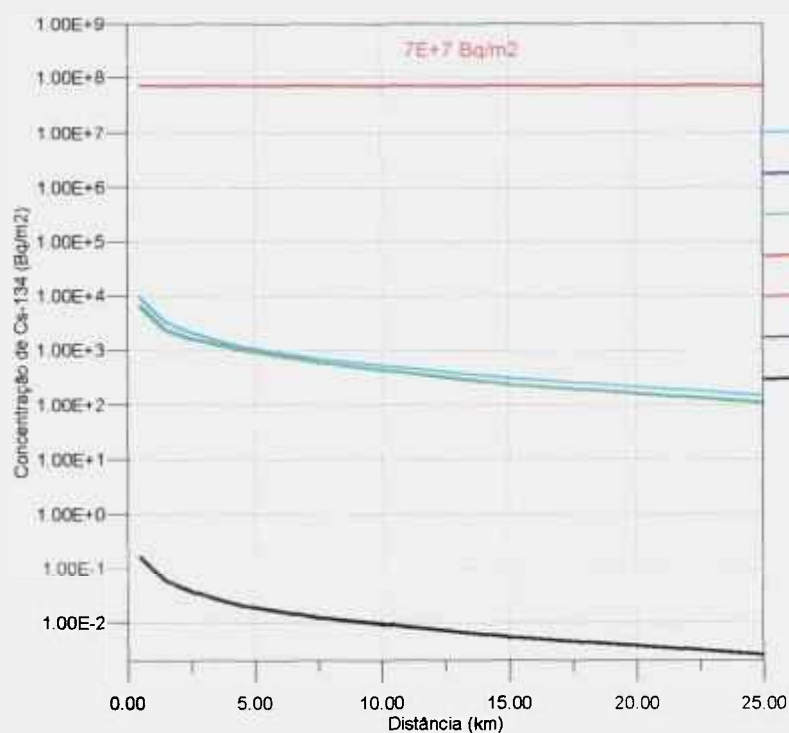
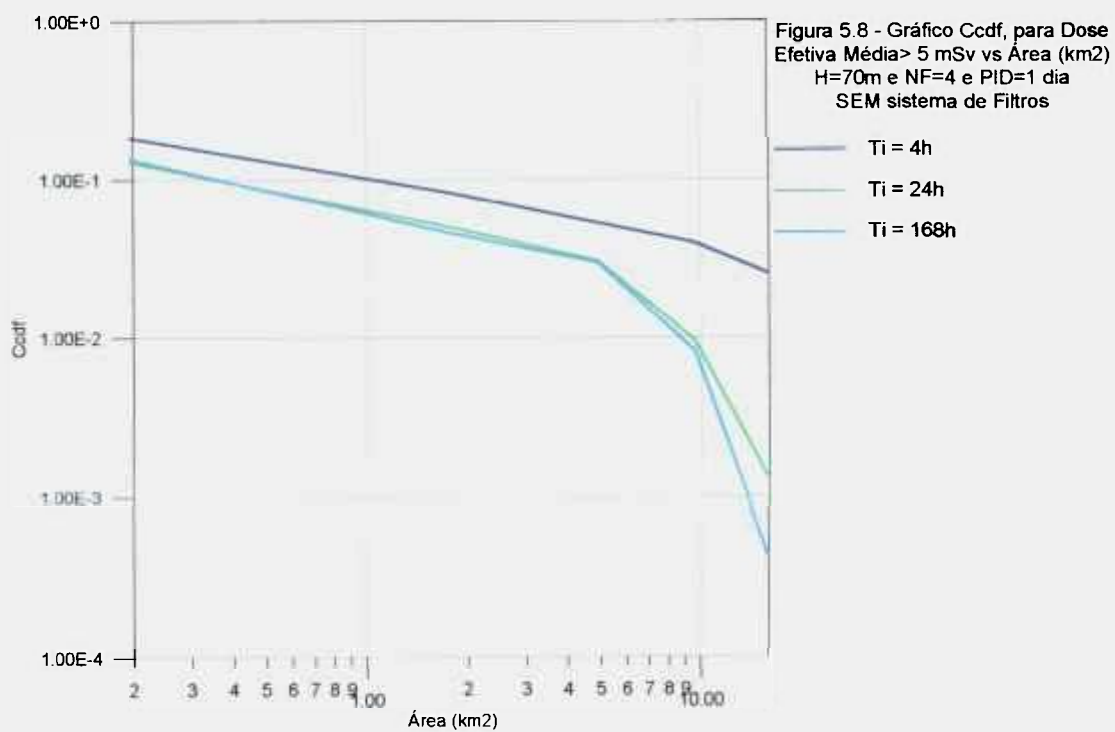
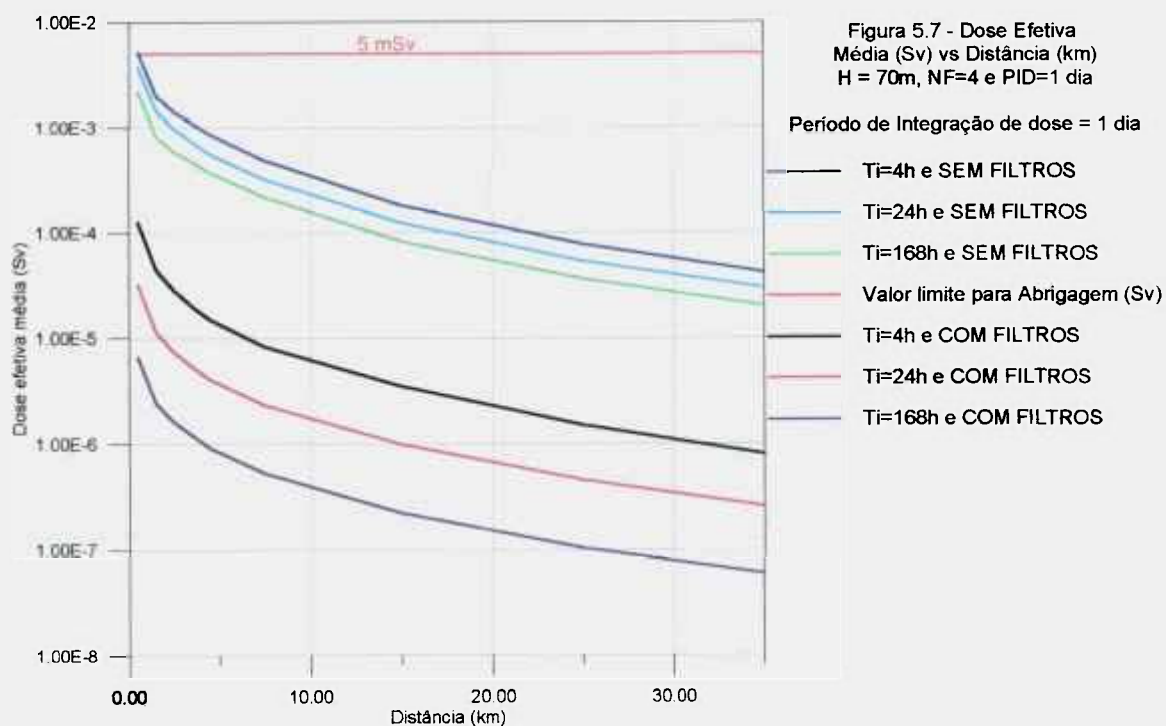
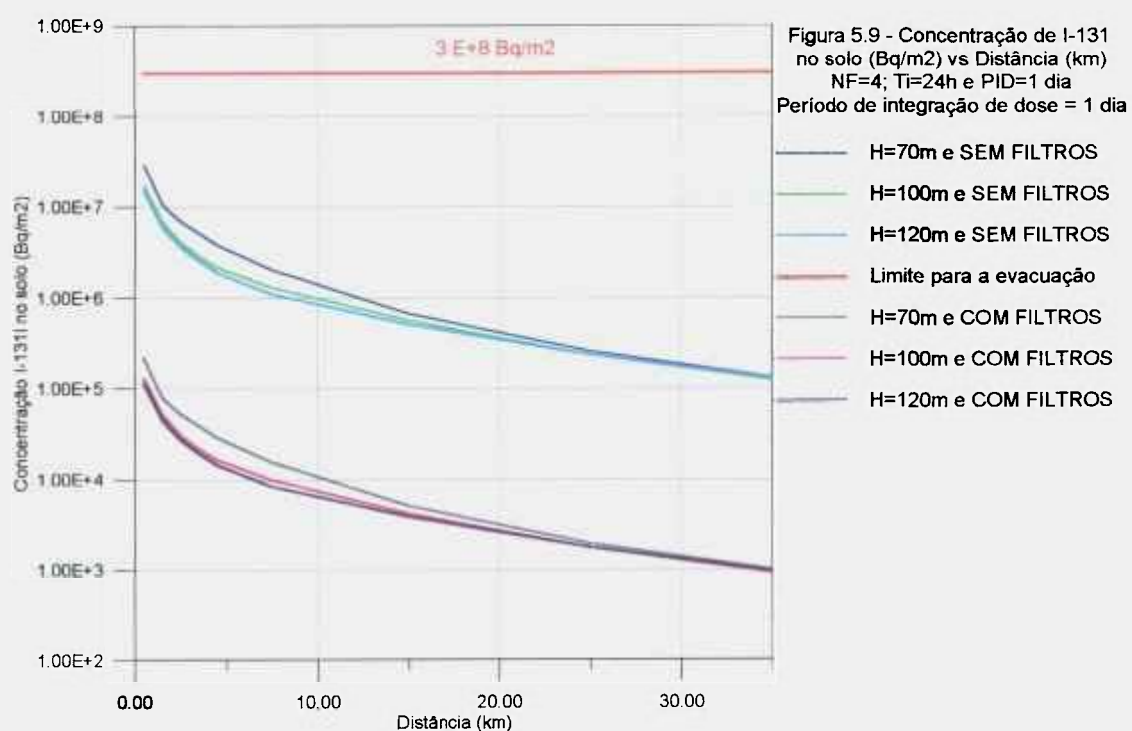


Figura 5.6 - Concentração média de Cs-134 no solo (Bq/m^2) vs Distância (km)
H=70m; NF=4 e PID=1 dia





5.4.1.2- Grupo 2.

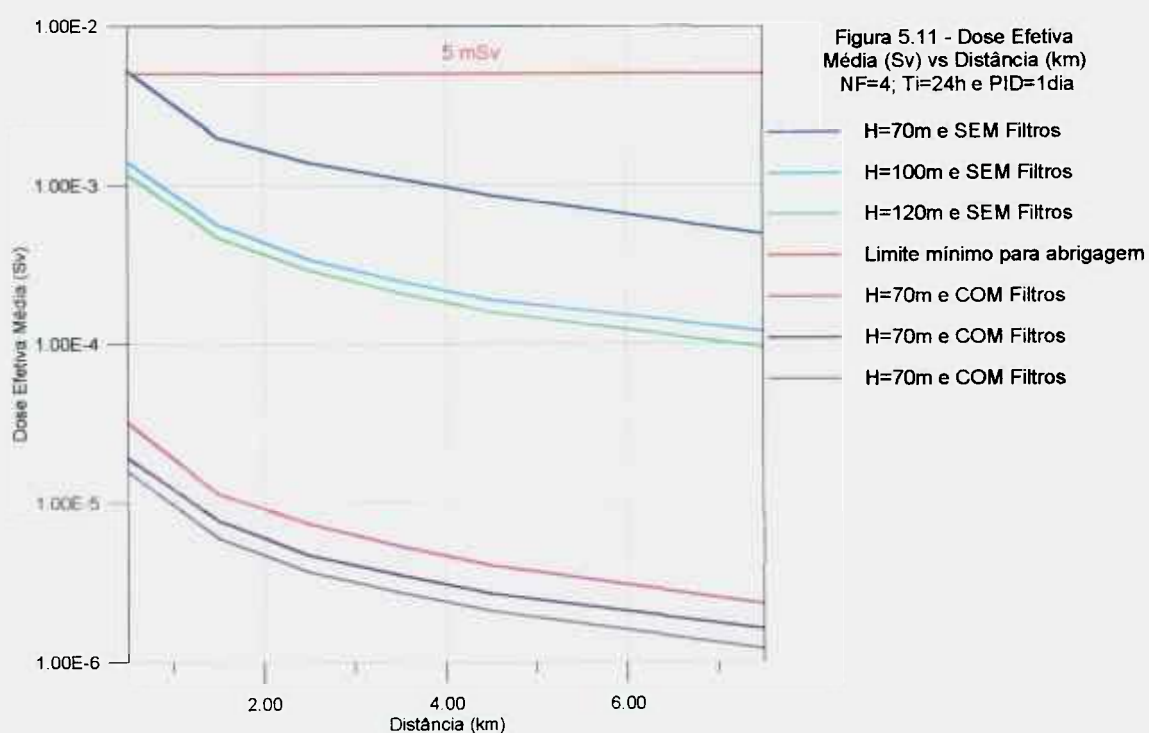
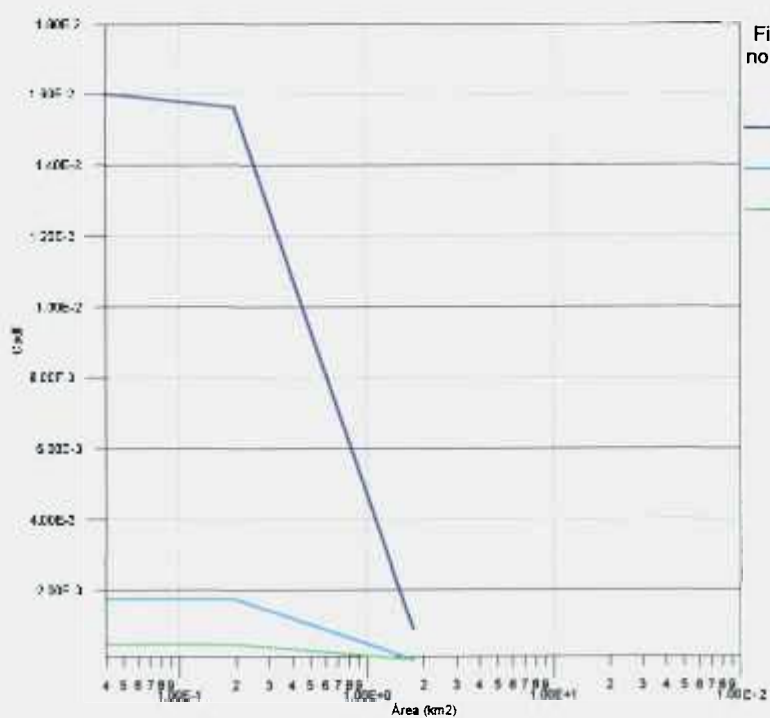
Nas simulações do Grupo 2 variou-se a altura da chaminé (H), mantendo-se constante o número de fases, o tempo inicial de liberação e o período de integração de dose.

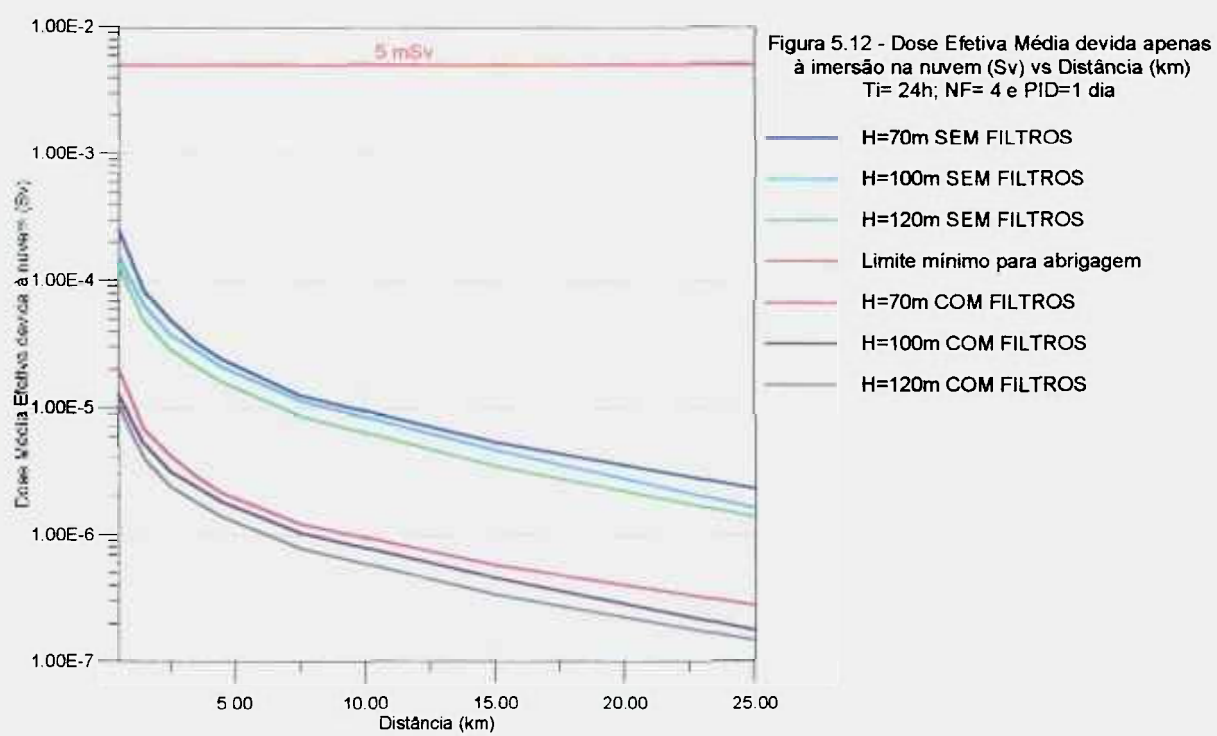
A influência de H na deposição no solo foi analisada apenas para o I-131 (Figuras 5.9 e 5.10). Observa-se na Figura 5.10 que o aumento da altura H causa uma redução acentuada na probabilidade da concentração do I-131 ultrapassar o limite de 3×10^8 Bq/m², para o caso sem Filtros. Com o uso dos Filtros a probabilidade cai para valores menores que 10^{-5} .

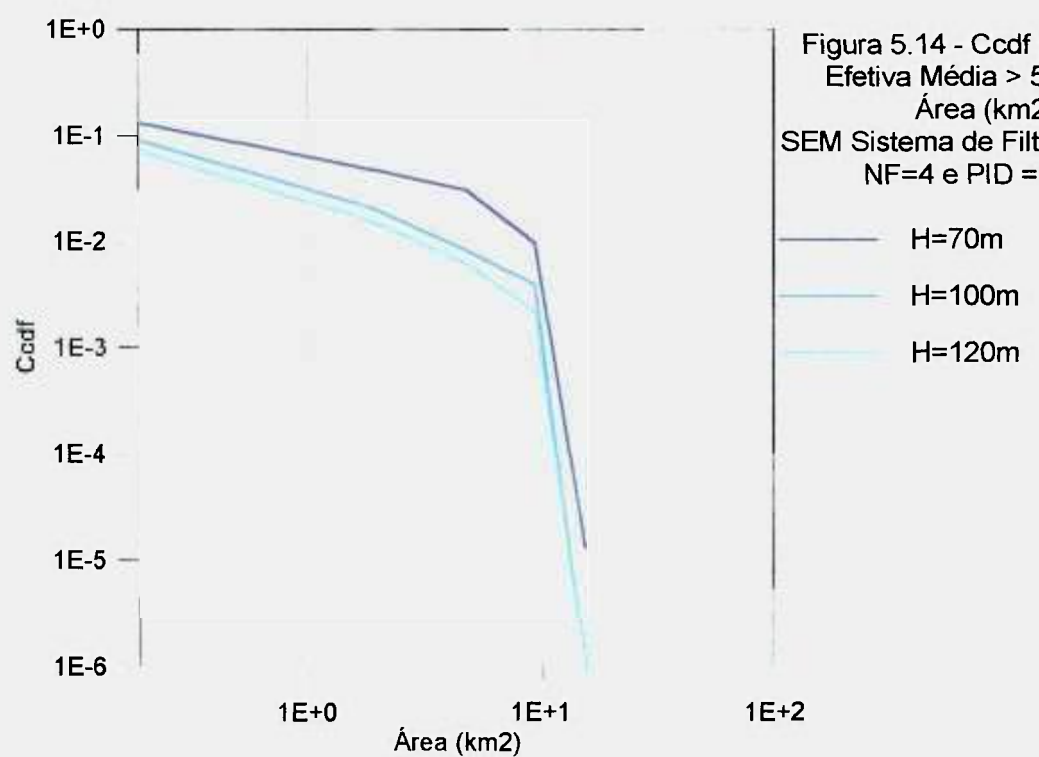
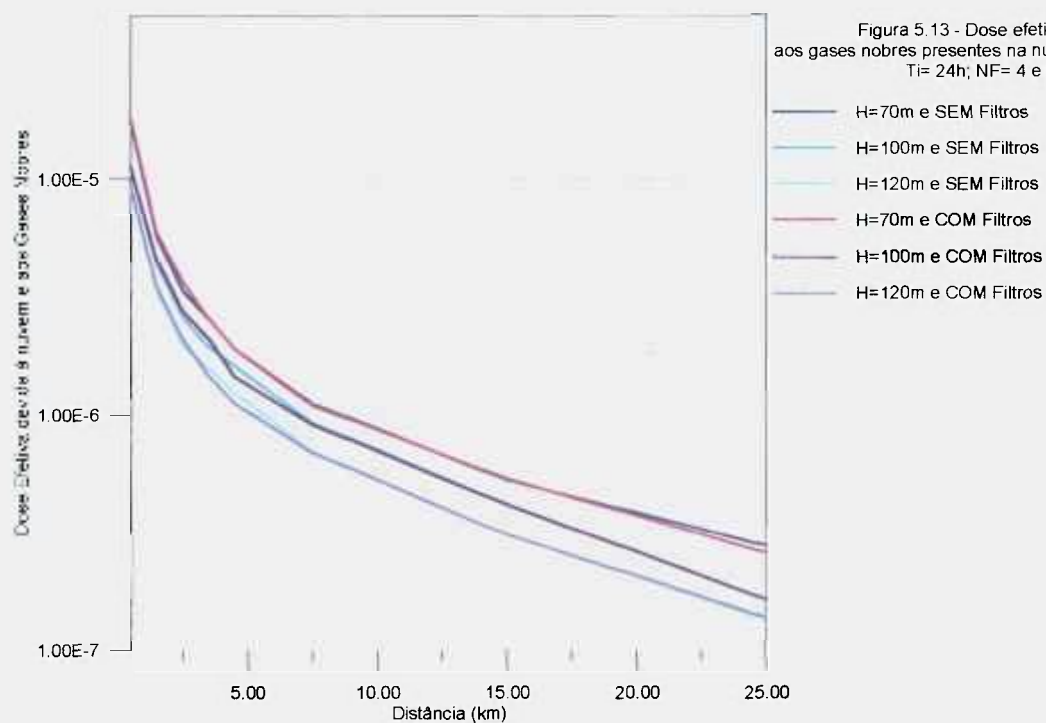
A Figura 5.11 mostra a variação da dose efetiva média ao nível do solo em função da distância e para várias alturas de chaminé. Observa-se que o aumento da altura da chaminé causa uma redução marginal na dose quando comparada com a do sistema de Filtros.

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram a dose efetiva média (Sv) devido a imersão na pluma e a parcela de dose devido apenas aos gases nobres, respectivamente. Comparando-se estas duas Figuras observa-se que, com a utilização de Filtros os gases nobres passam a ser os contribuintes principais na dose por imersão.

A Figura 5.14 apresenta a curva Ccdf para a dose efetiva média, sem filtros, mostrando a pequena influência de H na redução da probabilidade da dose efetiva média ultrapassar o valor limite de 5mSv.



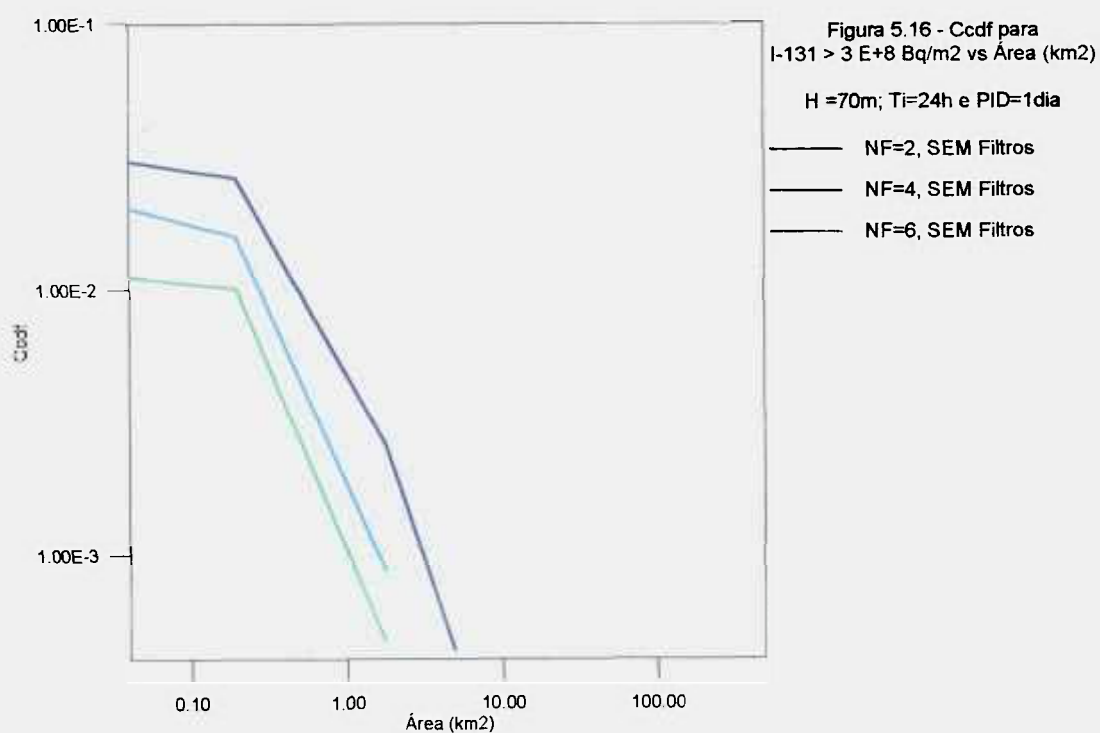
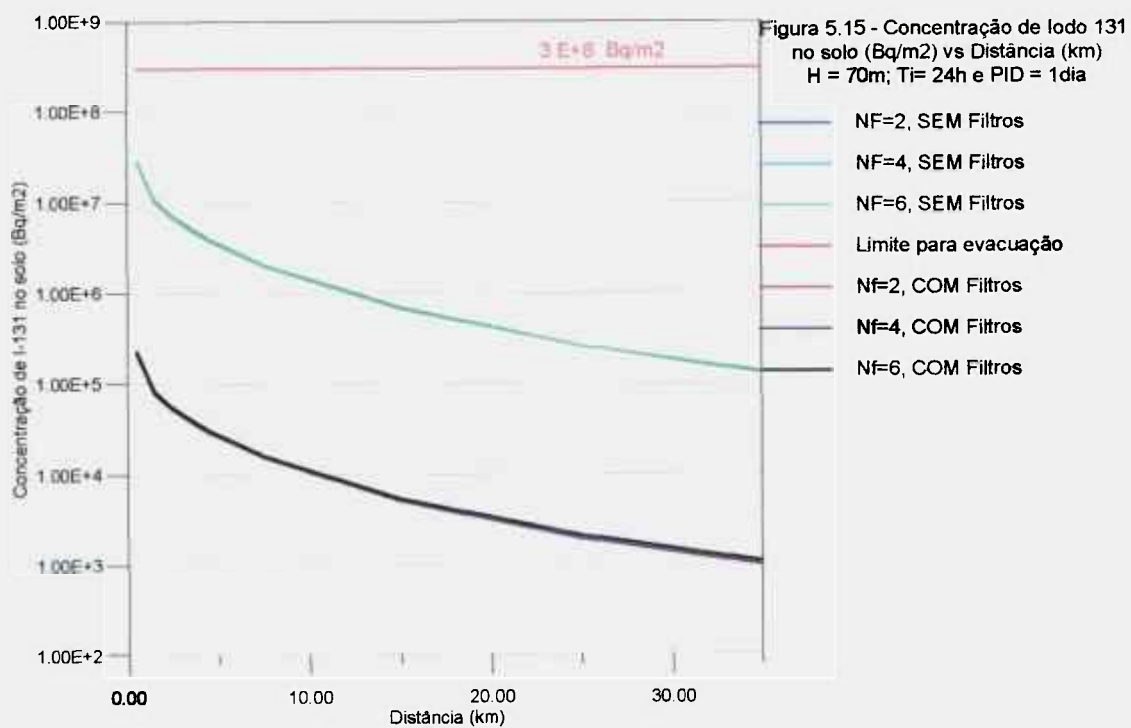


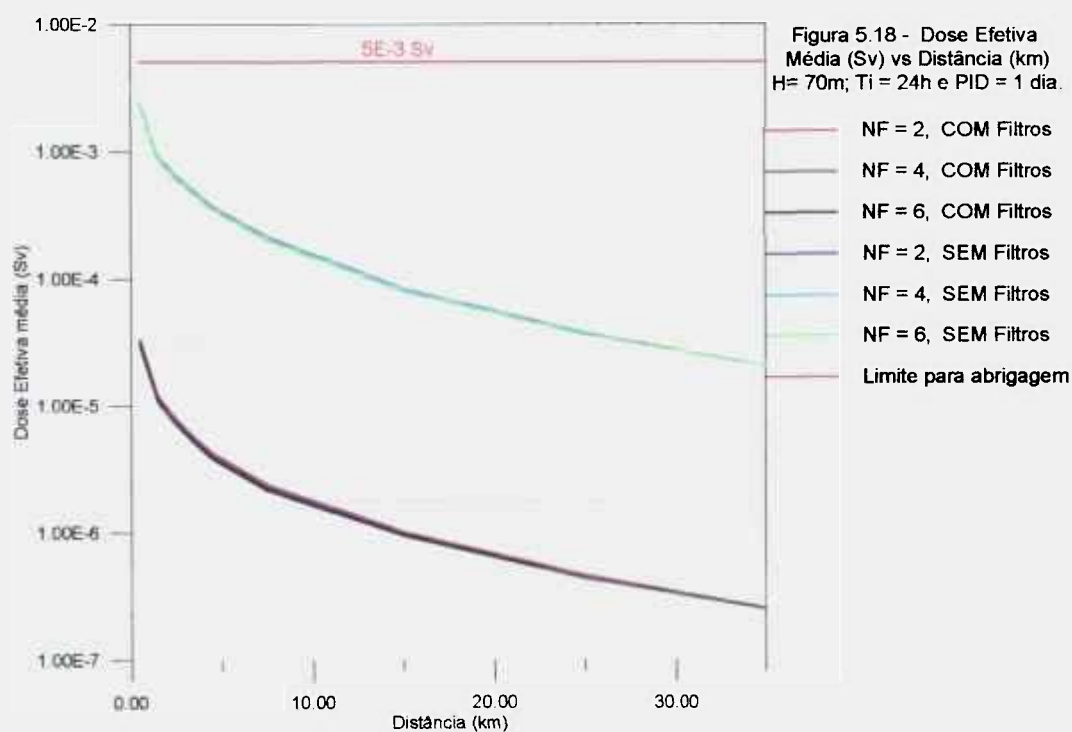
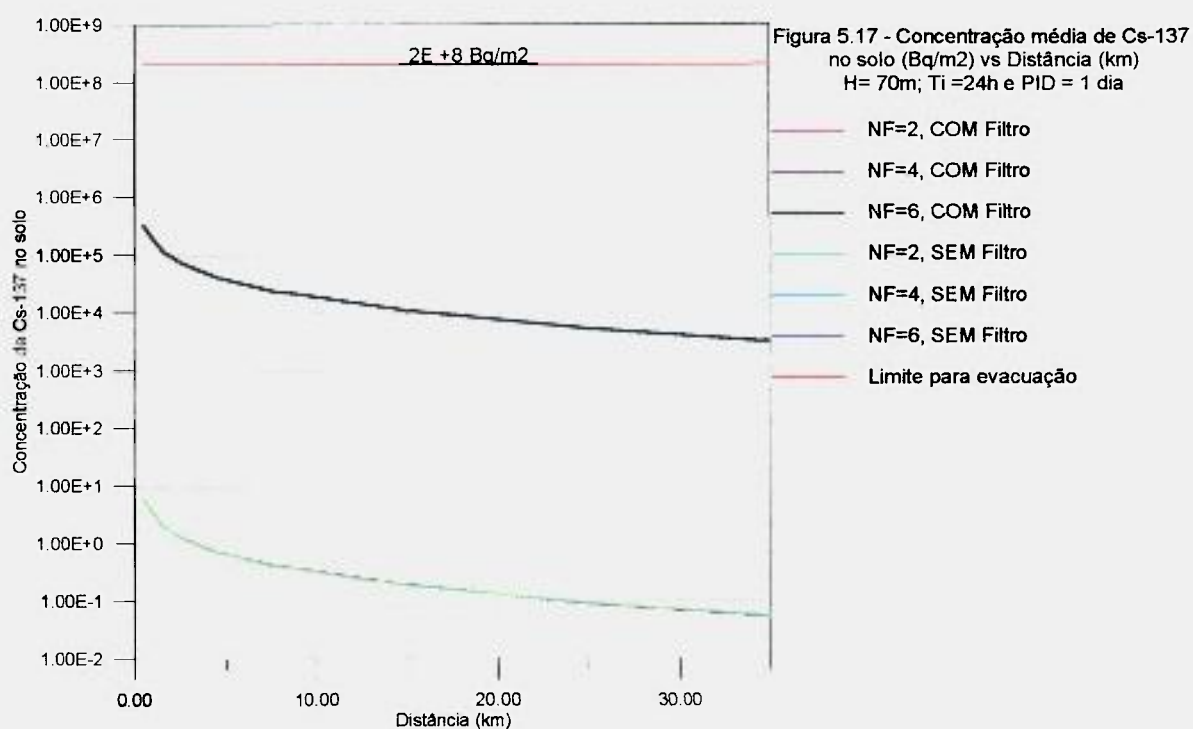


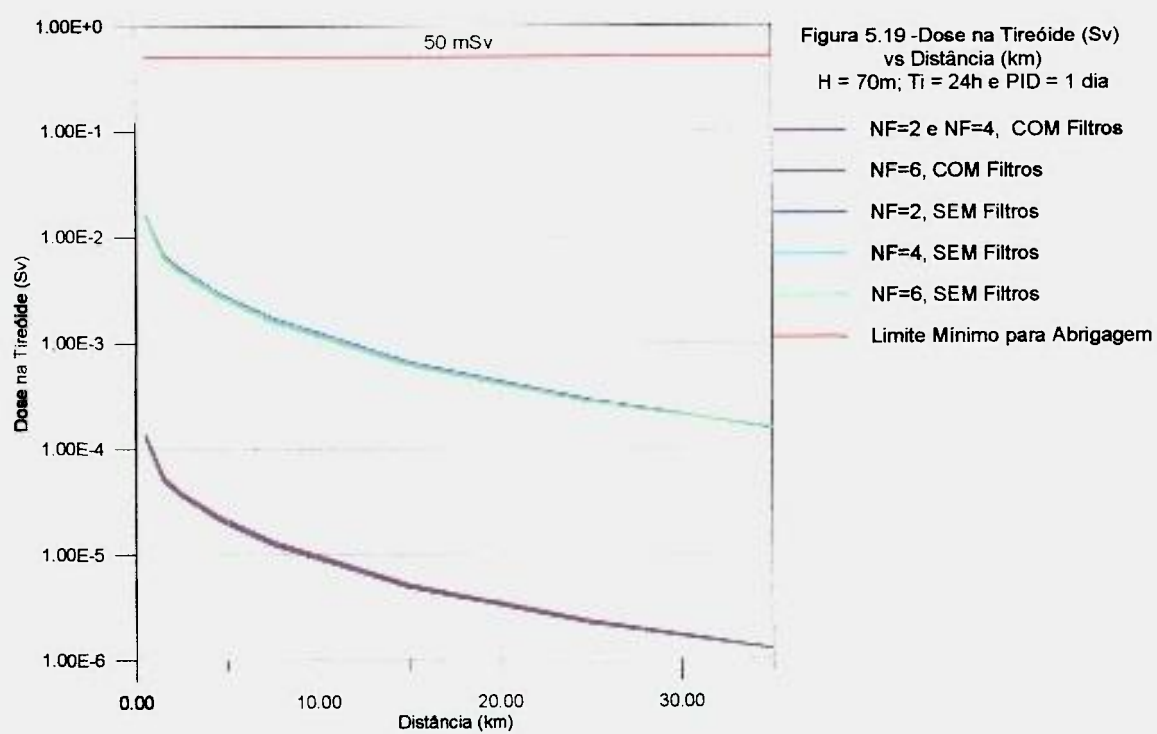
5.5.1.3- Grupo 3.

Neste Grupo variou-se as fases de liberação (de 2 a 6 fases), correspondendo a períodos de liberação de 1hora e 6 horas. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.15 a 5.19.

Em todos os casos não se observam nenhuma alteração nas consequências analisadas (concentração de I-131, concentração de Cs-137, dose efetiva média e dose efetiva na tireóide) em função da variação nos períodos de liberação.





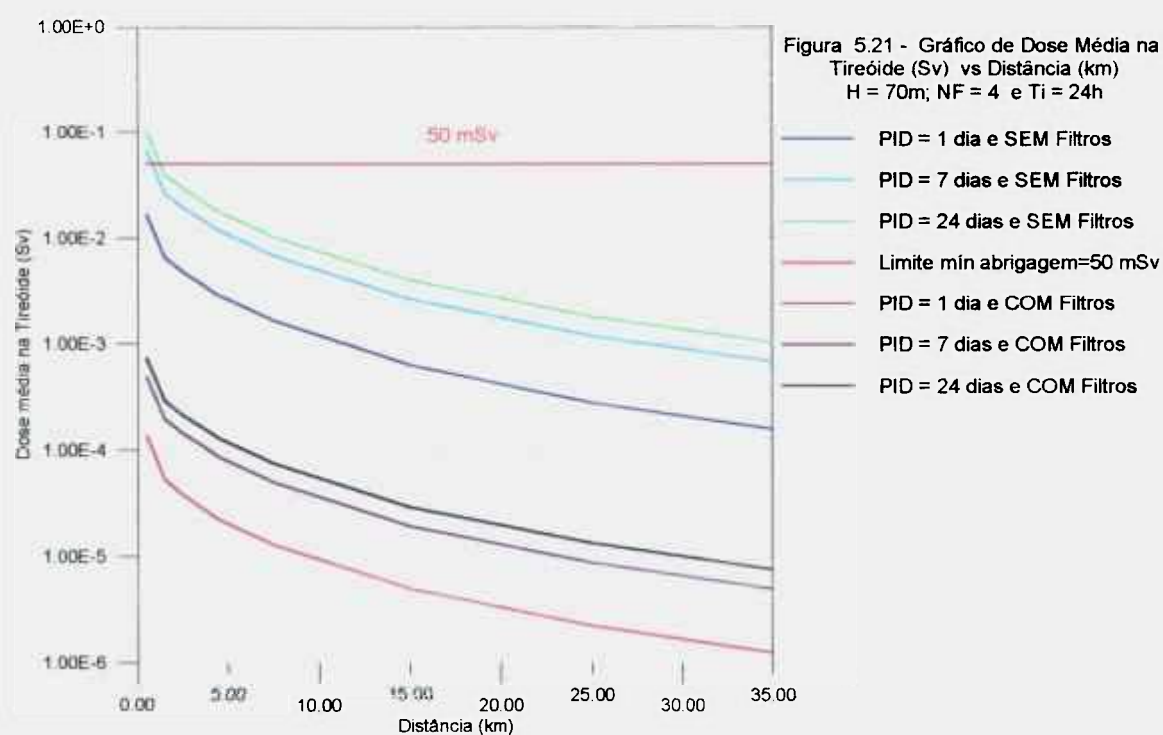
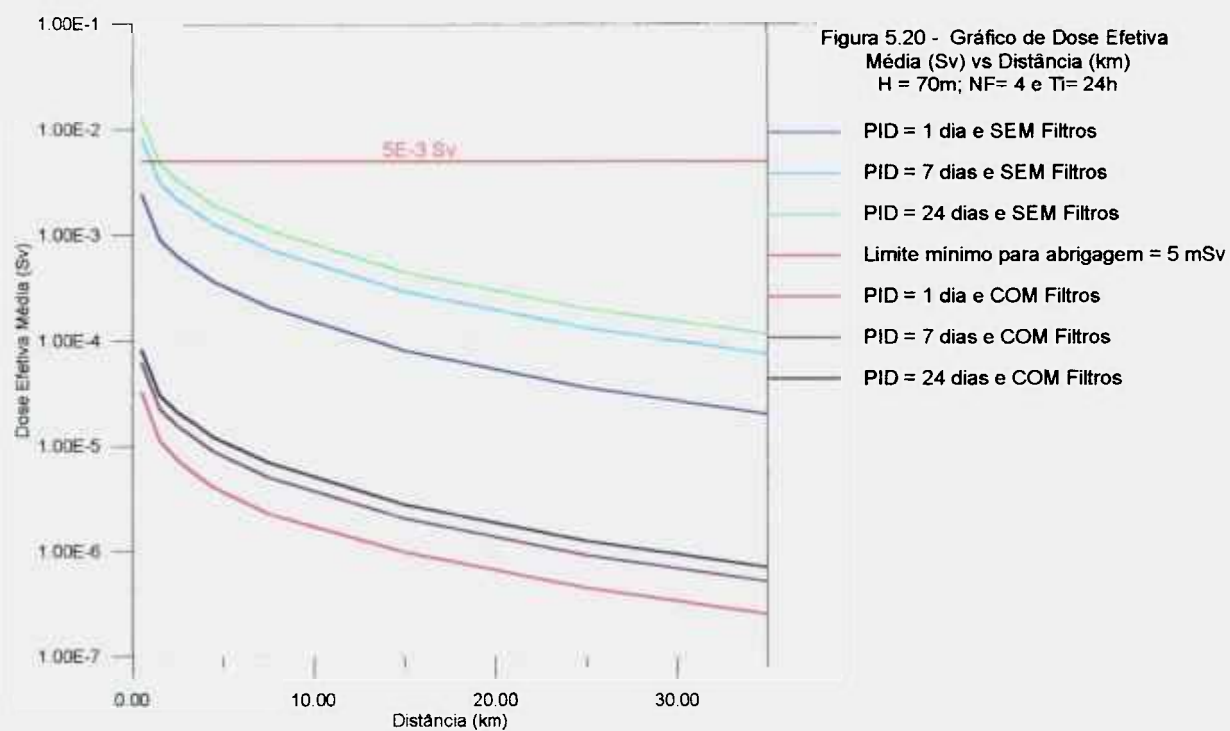


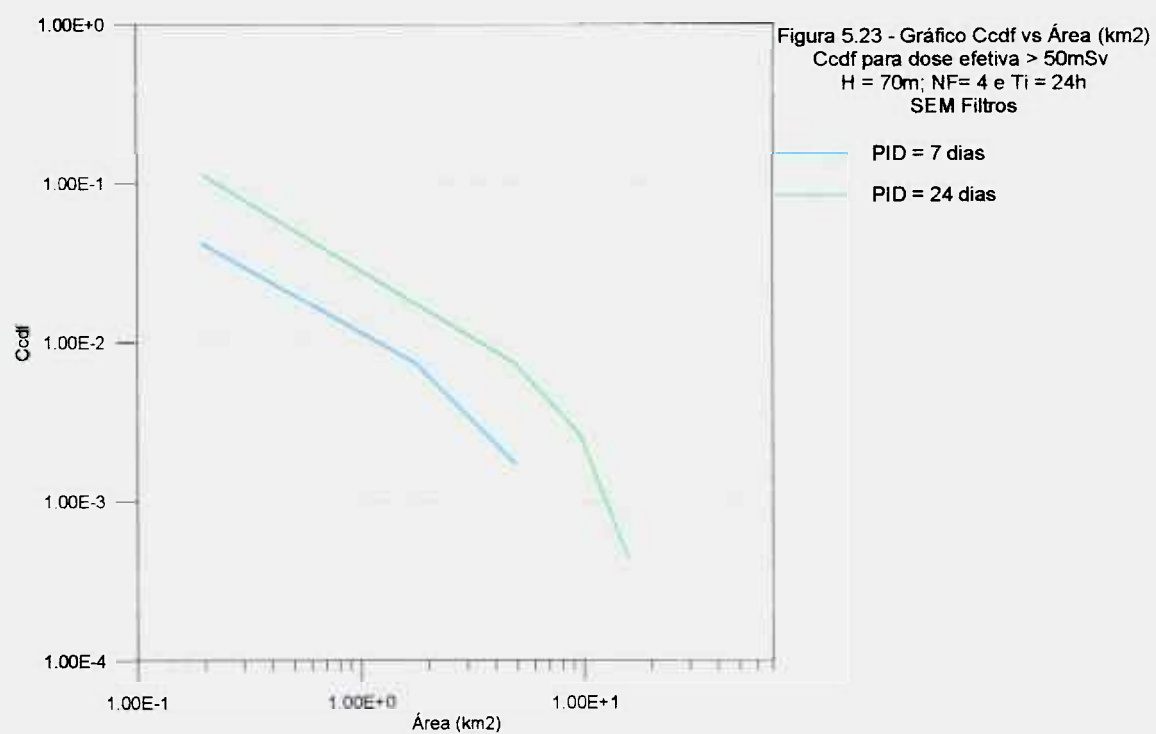
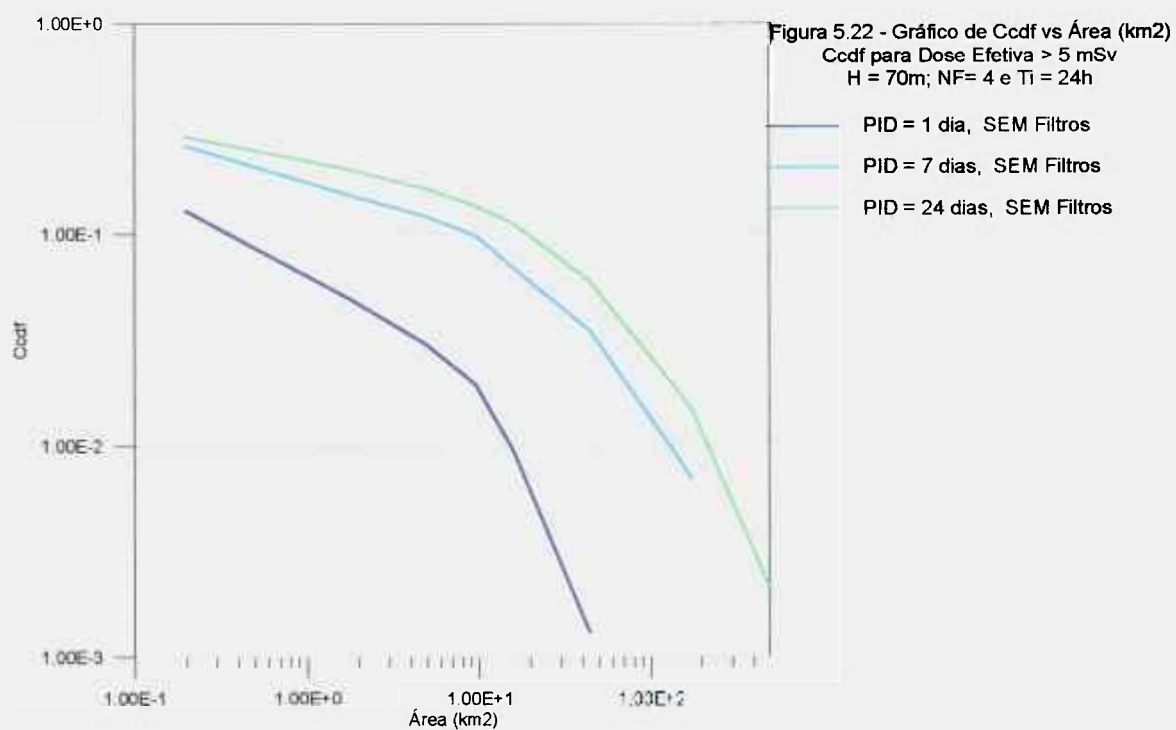
5.4.1.4- Grupo 4.

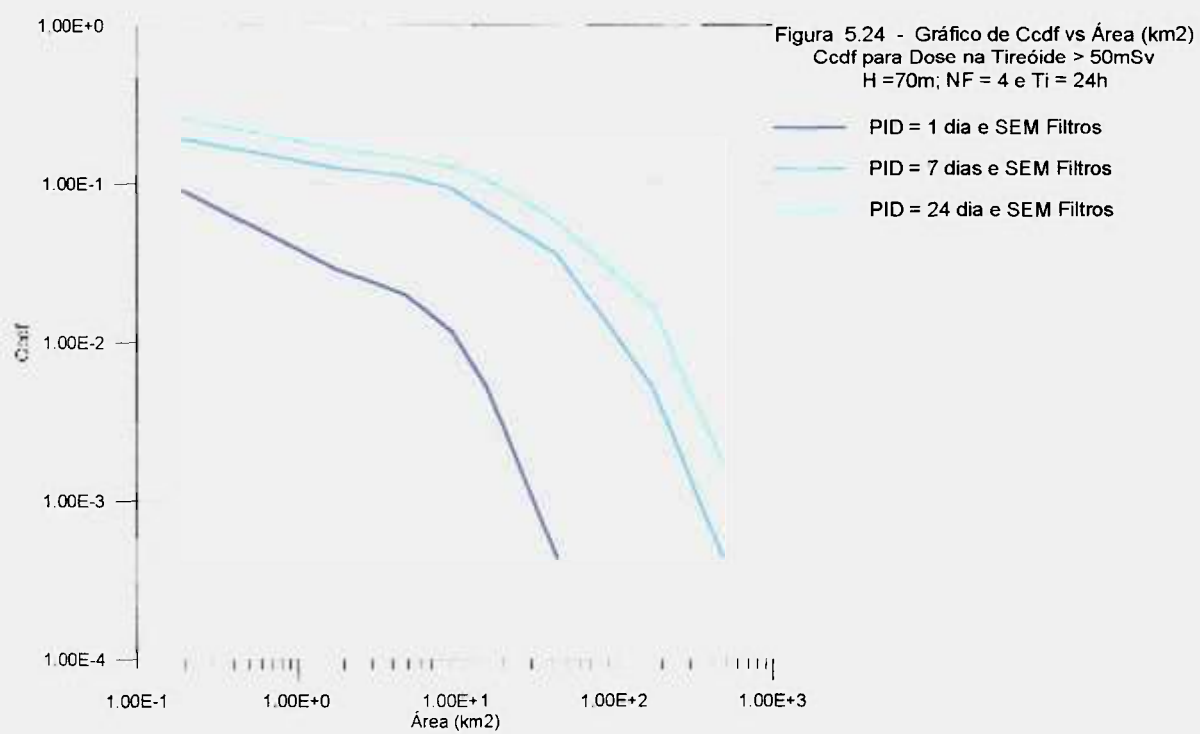
No Grupo 4 variou-se o período de integração de dose entre 1 a 7 dias (Casos IIa, IIb, VIIIa, VIIIb, IXa, IXb).

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram as curvas da dose efetiva média ao nível do solo e da dose média na Tireóide respectivamente. Verifica-se que, nos casos sem filtros, o aumento do período de integração de dose pode levar a doses superiores a 5mSv nas proximidades do ponto de liberação. Nos casos com Filtros esse valor não é ultrapassado em nenhum dos casos analisados.

As curvas Ccdf (Figuras 5.22, 5.23 e 5.24) mostram um sensível aumento na probabilidade de ser excedido o limite para abrigo, para dose efetiva média e na Tireóide.







Capítulo 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1- Conclusões

No Capítulo 5 foram analisadas as consequências de um acidente severo para um reator PWR de pequeno porte (50MWt). Considerou-se um reator com um Sistema de Alívio da Contenção e analisou-se a influência desse sistema na diminuição das consequências radiológicas externas. O acidente analisado assume que a contenção nuclear se mantém íntegra e que a liberação de radionuclídeos se dá pela chaminé da planta.

Tomou-se como parâmetro de avaliação a dose efetiva e os níveis de contaminação no solo que dispararam ações de intervenção imediatas (abrigagem e evacuação)

Os resultados mostram que a presença dos filtros reduz visivelmente as consequências externas mantendo-as em níveis inferiores aos limites de intervenção relacionados à Fase Inicial de Emergência.

Para os casos analisados, as doses efetivas próximas ao ponto de liberação, variam entre 0,01 e 0,1 mSv aproximadamente, sendo que o limite inferior para disparar ações de abrigagem é de 5 mSv.

Para o lodo, a redução dos níveis de contaminação do solo é da ordem de 100 vezes. Para o Cs-134 atinge 10^4 e para o Cs-137 é da ordem de 5×10^4 .

A probabilidade de que o limite de intervenção do lodo (3×10^8 Bq/m²) seja ultrapassado é da ordem de 2×10^{-3} a distâncias de aproximadamente 1,6 km da fonte de liberação.

Para o Plutônio as concentrações médias no solo estão muito abaixo dos limites de intervenção para esse radionuclídeo.

Observa-se que, sem filtro, os limites de intervenção podem ser ultrapassados, mas as ações de proteção ficam restritas a áreas próximas ao reator (raio da ordem de 4 km), o que se deve à pequena potência do reator e à liberação elevada via chaminé.

Como era previsto a presença dos filtros não altera a dose proveniente dos gases nobres. Essa dose somente pode ser reduzida pelo aumento de altura da chaminé. Um aumento de 50m na altura H resulta numa redução da ordem de 2 vezes, para a dose efetiva nas proximidades do reator.

6.2 – Recomendações para trabalhos futuros

No presente estudo foi gerado um Termo-Fonte genérico para acidentes severos, com dados disponíveis na literatura. Não houve a preocupação de identificar e modelar situações acidentais que exigiriam o conhecimento de detalhes do projeto do reator e, consequentemente o uso de ferramentas específicas para a análise dos fenômenos que ocorrem num acidente severo.

Como foi visto no Capítulo 3, as sequências acidentais dependem do tipo e configuração do reator, o que pode alterar não somente o Termo-Fonte mas também as suas probabilidades de ocorrência.

Um possível trabalho futuro seria a utilização de códigos da linha MELCOR (SUMMERS et al., 1991) para a simulação de um reator PWR de pequeno porte específico. Este estudo levaria a uma compreensão mais apropriada do Termo-Fonte e das sequências acidentais de acidentes severos em reatores de pequeno porte.

Em todos os casos analisados observou-se que as consequências radiológicas ficam limitadas a áreas próximas ao ponto de liberação. Um outro trabalho sugerido, seria investigar detalhadamente as consequências nas áreas vizinhas ao reator, incluindo todas as fases previstas em planejamento de emergência. Seriam analisados efeitos agudos e crônicos na população vizinha, bem como as consequências a curto e longo prazo da contaminação do solo. Ferramentas como o próprio PC-COSYMA ou códigos similares, poderiam ser utilizados nesse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Principles for Establishing Intervention Levels for the Protection of the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency*. 1985. (SS-72).

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *General Design Safety Principles for Nuclear Power Plants*. 1986a. (SS-50-SG-D11).

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Design of the Reactor Containment Systems in Nuclear Power Plants*, 1986b. (SS-50-SG-D125).

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Derived Intervention Levels for Application in Controlling Radiation Doses to the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency*,. 1986c. (SS-81).

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Techniques and Decision Making in the Assessment of Off-Site Consequences of an Accident in a Nuclear Facility*. 1987. (SS-86).

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants*. 1988. (SS-75-INSAG-3).

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Code on the Safety of Nuclear Research Reactors: Design*. 1992. (SS-35-S1).

ALPERT, D. J.; CHANIN, D.I.; RITCHIE, L.T. ***Relative importance of Individual Elements to Reactor Accident Consequences Assuming Equal Release Fractions.*** Prepared for NRC by Sandia National Laboratories, 1986. (NUREG/CR-4467).

ANG, M. L.; FRID, W.; KERSTING, E. J.; FREDERICH, G.; LEE, K. Y.; Meyer-Heine, D. A.; SODA, K.; SWEET, D. ***A comparison of world wide uses of severe reactor accident source terms.*** Sept. 1994. (SAND94-2157).

BALLARD, G. M. ***Nuclear Safety after Three Mile Island and Chernobyl.*** Elsevier, 1988.

BEAHM, E. C.; SHOCKLEY, W. E.; CULBERSON, O. L. ***Organic Iodine Formation Following nuclear reactor accidents.*** Prepared for NRC by Oak Ridge National Laboratory, Dec, 1985. (NUREG/CR-4327 ou ORNL/TM-9627).

BEAHM, E. C.; WEBER, C. F.; KRESS, T. S. ***Iodine Chemical Forms in LWR severe accident.*** Prepared for NRC by Oak Ridge National Laboratory, April, 1992 a. (NUREG/CR-5732 ou ORNL/TM-11861).

BEAHM, E. C.; WEBER, C. F.; LORENZ, R. A. ***Iodine Evolution and pH control.*** Prepared for NRC by Oak Ridge National Laboratory, April, 1992 b. (NUREG/CR-5950 ou ORNL/TM-12242).

BRIGGS, G. A. Plume rise predictions. In: HAUGEN, D. A. ***Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses.*** American Meteorological Society, Boston, Mass USA: 1976.

BULTYNCK, H.; MALET, L. M. Evaluation of atmospheric dilution factors for effluents diffused from an elevated continuous point source. *Tellus*, v. 24, p.455-472, 1972.

BUNZ, H.; KAYRO, M.; SCHOCK, W. **NAUA MOD4: A Code for calculating aerosol behavior in LWR core melt accidents**. Kerforschenszentrum Karlsruhe Germany, 1983. (KfK-3554).

CAO, J. Z.; YEUNG, M. R.; WONG, S. K.; EHRHARDT, J.; YU, K. N. Adaptation of Cosyma and Assessment of accident consequences for Daya Bay Nuclear Power Plant in China. *J. Env. Radioact.*, v.48, p.265-267, 2000.

CRICK, M. J.; BROWN, J. **A model for evaluating exposure from radioactive material deposits in the urban environment**. 1990. (NRPB-R235).

CROFF, A. G. **Isotope Generation and Depletion Code – RSIC Code Package CCC-372**, 1980. (ORNL/TM- 7175)

CYBULKIS, P.; WOOTON, R. O.; DENNING, R. S. **Effective containment venting on the risk from LWR melting accidents**. Batelle Columbus Laboratories, June 1978. (NUREG/CR-0138, BMI-2002).

CZECH, J.; FABIAN, H.; GAST, P.; GREMM, O. Mitigate of severe accident consequences by the containment design of KWU-LWR. *Nucl. Eng. Des.*, v. 117(1) p. 11-17, 1989.

DELALANDE, J. Why EdF is installing vented containment. *Nucl Eng. Int.* p. 33-35, 1987.

DILLMANN, H.; PASLER, H. ***A containment-venting from concept and its implementation with stainless steel filter.*** In: 5th INT.. MEETING ON THERMAL REACTOR SAFETY, September, 1984, Kat, Germany. pp. 1593-1605.

DILLMANN, H.; BUNZ, G. Design of a filter system for PWR containment venting. ***J. Aerosol. Sci.***, v. 22, sup. 1, p.S701-S704, 1991.

DINUNNO, J. J. et al. ***Calculation of Distance Factors for Power and Test Reactor Sites.*** US Atomic Energy Commission, Washington, D. C. 1962. (TID-14844).

ECKARDT, B.; HEINRICH, W. ***Filtered Containment Venting System.*** In: International conference on containment design and operation. Toronto, Canada. 14-17 Oct 1990.

ECKARDT, B.; HEINRICH, W. Installing filtered containment venting at Gundremmingen. ***Nucl. Eng.*** , February 1991.

ECKARDT, B. A.; BAT'ALIK, J. Filtered Venting Sustem for the Bohunice VVER 440/V 230 NPP. In: Severe Accident Risk and Management SARM'97, June 16-18 1997a. Pistany, Slovakia

ECKARDT, B. A.; HILL, A.; BETZ, R. Containment systems for H₂-reduction & filtered venting and in-situ sampling to mitigate severe accidents for E.G. multiple-unit VVER. In: Severe Accident Risk and Management SARM'97, June 16-18 1997b. Pistany, Slovakia.

EHRHARDT, J.; BURKART, K.; HASEMANN, I.; MAZERATH, C.; PANITZ, H.; STEINHAEUER, C. ***The program system UFOMOD for assessing the consequences of nuclear accidents.*** Karlsruhe, 1988. (KFK-4330).

EHRHARDT, J.; JONES, J. A. and GOOSENS, L. H. J.. Probabilistic Accident Consequences Uncertainty Analysis of the whole Program Package COSYMA. **Rad. Prot. Dosimetry**, v.90(3), p.365-372, 2000.

EIBL, J.; SCHULUTER, F. H.; CUPPERS, H.; HENNIES, H.H.; BREITUNG, W. How to eliminate containment failure in tomorrow's PWRs. **Nucl. Eng. Int.**, p. 51-55, April, 1992.

ESPEFALT, R. Severe accident mitigation programme for the Forsmark and Ringhals Plans. **Nucl. Eng. And Des.**, v.117, p. 19-24., 1989.

EVANS, J. S.; MUELLER, D. W.; COOPER, D. W. **Health effects models for nuclear power plant accident consequence analysis**. Ver.1, 1990. (NUREG/CR-4214).

FAUDE, D. **COSYMA: Modelling of economic consequences**. Karlsruhe, 1992. (KFK-4336).

FISHER, F.; HASEMANN, I.; JONES, J. A.. Techniques Applied in COSYMA Accident Consequences Uncertainty Analysis. **Rad. Prot. Dosimetry**, v.90(3), p.317-324, 2000.

GIESEKE, J. A. et al. **Source Term Code Package: A User's Guide**. Prepared for NRC by Battelle Memorial Institute, July 1986. .(NUREG/CR-4587 and BMI-2138)

GRUPA, J. B.; HASEMANN, I.. Probabilistic Accident Consequences Uncertainty Analysis of the Early Health Effects Module in COSYMA Package. **Rad. Prot. Dosimetry**, v.90(3), p.353-356, 2000.

HANNA, S. R.; GRIGGS, G. A.; HOSKER, R. P. ***Handbook on Atmospheric Diffusion. Technical Information Center***, US Department of Energy, 1982.

HASEMANN, I; EHRHARDT, J. ***COSYMA: Dose models and countermeasures for external exposure and inhalation***, 1994. (KfK-4333)

HARRISON, J. D.; BOARDMAN, J.; JONES, J. A.; KHURSHEED, A.; KRAAN, B. C. P. and PHILIPPS, A. W.. Probabilistic Accident Consequences Uncertainty Analysis of the Dose Calculation Module in the COSYMA Package. ***Rad. Prot. Dosimetry***, v.90(3), p.339-344, 2000.

HAYWOOD, S. M.; ROBINSON, C. A.; HEADY, C. ***COCO-1: model for assessing the costs of offsite consequences of accidental releases of radioactivity***. Chilton, 1991.(NRPB-R243)

HILL, M. D.; SIMMONDS, J. R.; JONES, J. A.. ***NRPB methodology for assessing the radiological consequences of accidental releases of radionuclides to atmosphere – MARC-1***. Chilton, London, 1988. (NRPB-R224)

INDUSTRY DEGRADES CORE RULEMAKING. ***Nuclear Reactor Power Plant response to severe accidents***. Industry Degrades Core Rulemaking Program, November, 1984.

ICRP. ***Radionuclide transformationa wnwefy and intensity of emissions***.. ICRP Publications 38. Ann., Oxford, Pergammon Press, 1983. (ICRP 11-13).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. ***Sinopse Censo Demográfico 1991***, dezembro, 1991.

JACOBI, W.; PARETZKE, H. J.; HENRICHS, K. ***Dosis faktoren für inkorporierte Radionuklide and Kontamination der Haut.*** Neuberberg, 1989.(GSF report 14/89)

JONES, J. A. The importance of modelling aspects of atmospheric dispersion and deposition in assessing the consequence of hypothetical accidental releases of radioactive material. ***Nucl. Saf.***, v.31(4), p.514-524, 1990.

JONES, K. R. et al. ***Timing analyses of PWR fuel pin failures.*** Idaho Eng. Lab., 1992.(NUREG/CR-5787).

JONES, J. A.; MANSFIELD, P. A. ; HAYWOOD, S. M.; HASEMAN, I.; STENINHAUER, C.; EHRHARDT, J.; FAUDE, D. ***PC Cosyma (v.2): An Accident consequence assessment package for use on a PC.*** 1996.(EUR16239-en).

JORDAN, H.; KUHLMAN, M. R. ***TRAP-MELT2 User's Manual.*** Prepared for NRC by Battelle Memorial Laboratory, May 1985. (NUREG/CR-4205 and BMI-2124),

KERNFORSCHUNGSZENTRUM AND NATIONAL RADIATION PROTECTION BOARD.
COSYMA: A new program package for accident consequences assesment. CEC. Brussels, 1991. (EUR-13028)

KUHLMAN, M. R.; LEHMICKE, D. J.; MEYER, R. O. ***CORSOR User's Manual.*** Prepared for NRC by Battelle Memorial Laboratory, March 1985. (NUREG/CR-4173 and BMI-2122)

LESLIE, . ***Relatório Preliminar de Análise de Segurança*** . Relatório Interno no. IPEN LI01-0999-004-IPEN-01-00, IPEN, 1997.

LEWIS, E. E. ***Nuclear Power Reactor Safety***, John Wiley, 1977.

LOWENHIELM, G.; ENGQVIST, A.; ESPEFALT, R. Accident management strategy in Sweden – implementation and verification. ***Nucl. Eng. and Des.***, v. 148, p. 151-159, 1994.

MCKENNA, T. J.; MARTIN, J. A.; MILLER, C. W.; HIVELY, L. M.; SHARPE, R. W.; GJITTER, J. G.; WATKINS, R. M. ***Pilot Program: NRC Severe Reactor Incident Response Trainig Manual.***, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1987.(NUREG-1210, Vol. 2 and 4).

MCKENNA, T. J.; GJITTER, J. G. ***Source Term Estimation During Incident Response to Severe Nuclear Power Plant Accidents.*** U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C, 1988. (NUREG-1228)

MCKENNA, T. J.; Trefethen, K. Gant; Jolicoeur, J.; Kuzo, G.; Athey, G. ***RTM-96: Response Technical Manual.*** U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1996. (NUREG/BR-0150, Vol. 1, Revis. 4).

MULLER, H. M.; JACOB, P. ***Gamma exposures from Gaussian clouds. Gesellschaft fur Strahlen und Umweltforschung*** (GSF) mbH. Neuherberg, 1991.

NATIONAL RADIATION PROTECTION BOARD. ***EMERGENCY Referente Levels: Criteria for limitng doses to the public in the event of accidental exposure to radiation***, 1981.(NPRB ERL2).

NOURBAKHSK, H. P.; KHATIB-RAHBAR, M.; DAVIS, R. E. ***Fission product release characteristics into containment under design basis and severe accident conditions.*** Brookhaven National Lab., 1988. (NUREG/CR-4881).

NOURBAKHSK, H. P. ***Estimates of Radionuclide release characteristics into containment under severe accidents.*** Brookhaven Nat. Lab., 1993. (NUREG/CR-5747).

OWCZARSKI, P. C.; POSTMA, A.K.; SCHRECK, R. I. ***Technical Bases and user's manual for the prototype of SPARC – A suppression pool aerosol remove Code.*** Prepared for NRC by Battelle Pacific Northwest Lab., 1985. (NUREG/CR-3317 e PNL-4742).

PANITZ, H.; PASLER-SAUER, J.; MATZERATH, C. ***UFOMOD: Atmospheric dispersion and deposition.*** Karlsruhe, 1989. (KfK-4332).

PÄSLER-SAUER, J. and JONES, J. A.. Probabilistic Accident Consequences Uncertainty Analysis of the Atmospheric Dispersion and Deposition Module in the COSYMA Package. ***Rad. Prot. Dosimetry***, v.90(3), p.331-338, 2000.

PAULI, W.; PELLAUD, B. ***Pressure release in the containments of Nuclear Power Stations*** Sulzser Technical Review, 4/1990.

PERSHAGEN, B.; NELSON, R. Nuclear Safety in Sweden policy and practice. ***Nucl. Safety***, v. 25, n. 1, 1984.

PERSSON, A. H. The filtered venting system under construction at Barseback. ***Nucl. Technol.***, v. 70, 1985.

POSTMA, A. K.; ZAVADOWSKI, R. W. ***Review of organic Iodide formation under accident conditions in Water Cooled Reactors.*** U. S. Atomic Energy Commission, Oct., 1972. (WASH-1233).

POWERS, D. A.; BROCKMAN, J. E.; SHIVER, A. W.. ***VANESA: A mechanistic Model of Radionuclides release and aerosol generation during core debris interactions with concrete*** . Prepared for NRC by Sandia National Laboratories, July 1986. (NUREG/CR-4308 e SAND-85-1370).

RAMSDELL, J. V.; ATHEY, G. F.; GLANTZ, C. S. ***MESOI Version 2.0: An Interactive Mesoscale Lagrangian Puff Dispersion Model with Deposition and Decay.*** U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C., 1983.(NUREG/CR-3344 (PNL-4753)).

RAMSDELL, J. V.; ATHEY, G. F.; SCHERPELZ, R. I. ***The MESORAD Dose Assessment Model.*** V. 2, Computer Code, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C, 1988. (NUREG/CR-4000 (PNL-5219)).

REIM, W.; HURLEBAUS, D. Protection of the containment of the thwin BWR KRBII plant against overpressure failure during severe accidents. ***Nucl. Eng. and Des.***, v. 157,p. 321-335, 1995.

ROLANDSON, S.; MÜLLER, F.; LÖWENHIELM, G. APRI 3 Project: Continued research concerning severe accident phenomena and management in Sweden. In: ***Severe Accident Risk and Management SARM'97***, Pistany, Slovakia, June 16-18 1997.

RUST, H.; TANNER, CH.; HEINTZ, W.; HASCHKE, D.; NUALA, M.; JAKAB, R. Pressure release of containments during severe accidents in Switzerland. **Nucl. Eng. and Des.**, v. 157, p. 337-352, 1995.

SAUNDERS, R. D.; ELLENDER, M.; KOWALCZUK, C. I.; SIENKIEWICZ, Z. J.; WOOD, N. R. **Dose-response relationships for early and continuing health effects**. Chilton, 1990.(NRPB-M246).

SANDIA LABORATORIES. **Program plan for the investigation of vent-filtered containment conceptual designs for water reactors**. October 1979.(NUREG/CR-1029).

SCHERPELZ, R. I.; BANDER, T. J.; ATHEY, G. F.; TAMSDALL, J. V. **The MESORAD Dose Assessment Model**. v. 1, Technical Basis., U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C., 1986.(NUREG/CR-4000 (PNL-5219)).

SCHETMANN, R.; HEISING, C.. Risk Assessment of the beneficial impact of a filtered venting containment system in a PWR with large, dry containment. **Ann. Nucl. Energy**, v.25(8), pp641-661, 1996.

SCHLUETER, R; SCHMITZ, R. P.. O. Filtered Vented Containments. **Nucl. Eng. Des.** v. 120, p. 93-103., 1990.

SCHOLTEN, L. C.; WONDEREN, E. L. M. J.; STEEN, J. **Effect of Filtering at containment Venting on the Consequences for the environment**. 1993.(NUREG/CP-0130 v. 2).

SJOREEN, A. L.; ATHEY, G.F.; RAMSDELL, J. V.; MCKENNA, T. J. ***Rascal Version 2.1 User's Guide.***, v. 1, rev.2, Dec. 1994. (NUREG/CR-5247).

SOFFER, L.; BURSON, S. B.; FERRELI, C. M.; LEE, R. Y; RIDGELY, J. N.. ***Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants.***, US Nuclear Regulatory Commission, Feb., 1995.(NUREG-1465)

STATHER, J. W.; MUIRHEAD, C. R.; EDWARDS, A. A.; HARRISON, J. D.; LLOYD, D. C.; WOOD, N. R. ***Health effects models developed from the 1988 UNSCEAR report.*** Chilton, London, HMSO, 1988.(NRPB-R226).

STEINHAUER, C. ***COSYMA: Ingestion pathways and foodbans.*** ,1992. (KfK-4334).

STRAKA, J.; GEIß, H.; VOGT, K. J. Diffusion of waste air puffs and plumes under changing weather conditions. ***Contr. Atmos. Phys.***, v. 54, p. 207-221, 1981.

SUMMERS, R. M. et al.. ***"MELCOR 1.8.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Sever Accident Source Term and Risk Assessment Analysis"***.Prepared for NRC by Sandia National Laboratory, January, 1991.(NUREG/CR--5531).

TUOMISTO, H. Filtered Venting Considerations of an ice condenser containment. ***Nucl. Eng. Des.***, v. 117, p. 25-31, 1989.

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. ***Reactor Site Criteria Title10.*** Code of Federal Regulations (CFR), Part 100.

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Assumption Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Boiling Water Reactors. In: **Regulatory Guide 1.3**. June, 1974a. Revision 2.

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Assumption Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Pressurized Water Reactors . **Regulatory Guide 1.3**. June 1974b. Revision 2.

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Reactor Safety Study: An Assesment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants**. Dec., 1975. (WASH-1400).

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **NRC action plans developed as a result of TMI accident**. US Nuclear Regulatory COMMISSION, March 1980.(NUREG-0660)

US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants**. December 1990. (NUREG-1150).

WEBER, C. F.; BEAHM, E. C.; KRESS, T. S. **Models of Iodine Behavior in Reactor containments**. Prepared for NRC by Oak Ridge National Lab., 1992 (ORNL/TM-12202).

WINEGARDNER, W. K.; POSTAN, A. K.; JANKOWSKI, M. W. **Studies of fission products scrubbing within ice compartments**. Prepared for NRC by Battelle Pacific Northwest Lab., 1983 (NUREG/CR-3248).

VARLEY, J. Germans take a new look at core melt consequences. **Nucl. Eng. Int.**, p. 35-38, 1987.

**UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE
BASEADA EM ÁRVORE DE FALHAS E LÓGICA FUZZY**

Antônio César Ferreira Guimarães

**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 OBTENÇÃO DO
GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
CIVIL**

**RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
OUTUBRO DE 1997**

UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE
BASEADA EM ÁRVORE DE FALHAS E LÓGICA FUZZY

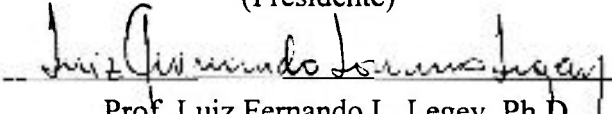
Antônio César Ferreira Guimarães

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE 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 CIVIL.

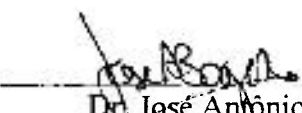
Aprovado por:



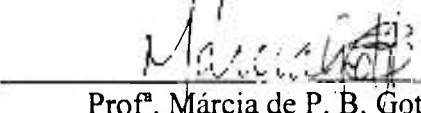
Prof. Nelson F. F. Ebecken, D.Dc
(Presidente)



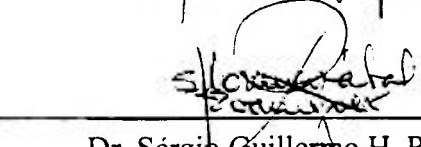
Prof. Luiz Fernando L. Legey, Ph.D



Dr. José Antônio B. Geymayr, D.Sc.



Profª. Márcia de P. B. Gottgroy, D.Sc.



Dr. Sérgio Guillermo H. Rodríguez, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
OUTUBRO DE 1997

GUIMARÃES, ANTONIO CESAR FERREIRA

Uma Metodologia para Análise de Confiabilidade baseada em
Árvore de Falhas e Lógica Fuzzy [Rio de Janeiro] 1997

XIX. 190 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D. Sc., Engenharia Civil,
1997)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Lógica Fuzzy.
2. Análise de Árvore de Falhas.
3. Análise Confiabilidade
4. Medidas de Importância. Incertezas.
5. Programação Delphi3.0.

I. COPPE / UFRJ II. Título (série)

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

UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE BASEADA EM ÁRVORES DE FALHAS E LÓGICA FUZZY

Antônio César Ferreira Guimarães

Outubro/1997

Orientador: Nelson F. F. Ebecken

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho tem por finalidade o desenvolvimento de um modelo de cálculo para determinação de medidas de importância e medida de importância de incertezas baseadas na metodologia Fuzzy. Um sistema computacional foi desenvolvido e pode ser empregado em qualquer instalação industrial, mas neste estudo foram utilizados os dados do projeto de Angra I, como referência principal, estando assim inserido no contexto de licenciamento de Instalações Nucleares de Potência. Os resultados alcançados podem seguramente ser utilizados para fazer recomendações de mudança de especificação de projeto ou desenvolver uma política de manutenção para aumentar a confiabilidade dos sistemas de segurança.

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

A METHODOLOGY USING FAULT TREE AND FUZZY LOGIC FOR
RELIABILITY ANALYSIS

Antônio César Ferreira Guimarães

October/1997

Advisor: Nelson F. F. Ebecken

Department: Civil Engineering

The present study deals with development of model to determine fuzzy importance measure and fuzzy uncertainty importance measure with fuzzy approach. A new approach is presented to rank the system components or basic events depending on their contribution to the top event failure probability and their uncertainty contribution to the uncertainty of the top event based on fuzzy set theory. A software was built and can be applied in any commercial installation. In this thesis the Angra I Nuclear Power Plant data was applied for reference site and then the results are according with the licensing requirements. Also, the results safely give recommendations for system maintenance and any project specification changes.



AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que colaboraram na elaboração desta tese, os meus sinceros agradecimentos, em particular à:

1. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) - pela autorização para realizar este trabalho de tese.
2. Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) - através de seu superintendente Dr. Luis A I. Arrieta, a quem devo agradecimento todo especial.
3. Centro de Informações Nucleares (CIN) - pelo número significativo de trabalhos obtidos no país e no exterior.
4. Aos colegas do IEN, em especial ao amigo Leonardo Falcão Koblitiz.
5. Todos do Departamento de Engenharia Civil.

E de forma muito especial ao meu orientador e amigo, Dr. Nelson F. Ebecken, que de uma maneira sempre amiga, compreensiva, tolerante e motivadora, serviu de fonte de estímulo para continuidade deste trabalho e término. Palavras faltam para escrever todas as formas de agradecimento ao meu orientador. É muito grande a importância deste trabalho para mim, pois representa momentos da espera do período adequado para o início e a escolha de um local receptivo. Momentos difíceis sempre existem mas são superados. A escolha de um tema de tese, conveniente para ambas as partes. Todas as dificuldades para adequar uma série de fatores ficaram superadas na medida em que pude contar com o auxílio e apoio de um verdadeiro orientador. Mais uma vez fica registrado o meu sincero e eterno muito obrigado ao Prof. Nelson.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Apresentação.	1
1.2 - Objetivos.	5
1.3 - Revisão Bibliográfica.	5
1.4 - Organização da Tese.	23
2. LÓGICA FUZZY	25
2.1 - Visão Geral	25
2.2 - Os Fundamentos em teoria Fuzzy.	30
2.3 - Projeto de um Sistema Fuzzy.	41
2.3.1 - Seleção das Variáveis de Entrada e Saída.	41
2.3.2 - Quantização do Universo de Discurso das Variáveis de Entrada e Saída.	42
2.3.3 - Composição de Regras de Inferência	42
2.3.4 - Definição das Funções de Pertinência	43
2.3.5 - Discretização do Universo de Entrada e Saída	44
2.3.6 - Seleção do Tipo de Implicação (Min. / Máx.)	44
2.3.7 - Seleção do Método de Correlação (Mínimo / Produto)	45
2.3.8 - Seleção do Método de Defuzzificação (Centróide / Altura Máxima)	46
2.4 - Aritmética Fuzzy, Modelos Probabilísticos x Possibilísticos, Números Híbridos	46

3. ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS	50
3.1 - Conceitos Básicos de Análise de Árvore de Falhas	51
3.2 - Os Elementos Básicos de uma Árvore de Falhas	51
3.3 - Os Fundamentos para Construção de Árvore de Falhas	52
3.4 - Avaliação da Árvore de Falhas	56
3.5 - Códigos Computacionais	69
4. FUZZIFICAÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS E ANÁLISE DE INCERTEZAS	72
4.1 - Análise da Árvore de Falhas Utilizando Falhas Possibilísticas	72
4.2 - Análise Possibilística pelo Método Euclideano	76
4.2.1 - Medida de Importância Fuzzy (“Fuzzy Importance Measure”)	82
4.2.2 - Medida de Importância de Incerteza Fuzzy (FUIM)	83
5. IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS	84
5.1 - Fases de implementação no FuzzyFTA	84
5.1.1 - Tratamento da Árvore de Falhas completa	87
5.1.2 - Tratamento da Árvore de Falhas com Cortes Mínimos	100
6. RESULTADOS	117
6.1 - Primeiros Resultados com FuzzyFTA	117
6.2 - Aplicação da Metodologia	121
6.3 - Comparação entre Metodologias	128
7. CONCLUSÕES	135

7.1 - Observações Iniciais sobre os Resultados.	136
7.2 - Críticas ao Modelo.	137
7.3 - Recomendações e Sugestões Futuras	138
7.3.1 - Quanto ao Aplicativo Demo FTA	138
<u>7.3.2</u> - Modelo Híbrido	139
<u>7.3.3</u> - Uma Abordagem Modular para Analisar Árvores de Falhas Estática e Dinâmica.	140
7.3.4 - Uma Abordagem Inteligente.	141
8. APÊNDICE A - DESENVOLVIMENTO DO FUZZYFTA EM DELPHI30	145
8.1 - A Ferramenta Delphi 3.0	145
8.2 - Algoritmo, Estruturas de Dados e Programação.	153
8.3 - O código FuzzyFTA.	156
9. APÊNDICE B - RELATÓRIOS E VISUALIZAÇÃO DE DADOS	162
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Funções de pertinências para (a) $\mu_{A \cup B}$ e (b) $\mu_{A \cap B}$	34
Figura 3.1 - Gráfico da árvore de falhas para cálculo de cortes mínimos.....	71
Figura 6.1 - Gráfico da árvore de falhas do exemplo 1, (P.V. Suresh).	118
Figura 6.2 - árvore do SAAA.....	126
Figura 6.3 - Gráfico da árvore do exemplo do aplicativo PHASER (Lab. de SANDIA).	130
Figura 6.4 - Incerteza do Evento topo Fuzzy para o exemplo 2 do manual PHASER.	132
Figura 6.5 - Gráfico da árvore do aplicativo IRRAS.	133
Figura 7.1 - Acesso à base de dados utilizando o “DataBase Engine”.	143
Figura 7.2 - Arquitetura do DBE	144
Figura 8.1 - Interface para cálculo dos valores principais	157
Figura 8.2 - Interface para visualização lógica da árvore de falhas	158
Figura 8.3 - Interface para edição dos dados de entrada para os componentes.....	159
Figura 8.4 - Interface para construção lógica da árvore de falhas.....	160
Figura 9.1 - Lâmina 1 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 1, Sistema de Proteção do Reator, e visualização dos dados.	164
Figura 9.2 - Lâmina 2 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 1, Sistema de Proteção do Reator, e visualização de dados.	166
Figura 9.3 - Lâmina 3 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 2, ANGRA - 1, e visualização dos dados.	168
Figura 9.4 - Lâmina 4 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 2, ANGRA - 1, e visualização de dados.	170

Figura 9.5 - continua.....	172
Figura 9.6 - continuação.....	174
Figura 9.7 - Lâmina 5 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 3, SANDIA, e visualização dos dados.	176
Figura 9.8 - Lâmina 6 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 3, SANDIA, e visualização de dados.	178
Figura 9.9 - Lâmina 7 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 4, IRRAS, e visualização dos dados.....	180
Figura 9.10 - Lâmina 8 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 4, IRRAS, e visualização de dados.	182

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Critérios para estimar limites superior e inferior da taxa de falha estimada.	74
Tabela 6.1 - Resultados obtidos com o aplicativo fuzzyFTA	120
Tabela 6.2 - Valores limites inferiores e superiores para a probabilidade de falha do evento topo com cortes mínimos e sem cortes, para diferentes valores de “alfa-levels”	120
Tabela 6.3 - Resultados obtidos com o aplicativo fuzzyFTA.	127
Tabela 6.4 - Importância dos termos algébricos.	128

Lista de Equações

$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$	Equação 2.1	32
$A = \{0.3/x_1, 0.7/x_2, 1/x_3, 0.5/x_4, 0.1/x_5\}$	Equação 2.2	32
$A = \mu_a(x_1)/x_1 + \dots + \mu_a(x_n)/x_n$	Equação 2.3	32
$= \sum \mu_a(x_i) / x_i$	Equação 2.4	33
$A = \int \mu_a(x)/x$	Equação 2.5	33
$\mu_a(x) = \mu_b(x)$ para todo $x \in X$	Equação 2.6	33
$\mu_a(x) = 1 - \mu_b(x)$ para todo $x \in X$	Equação 2.7	33
$\mu_a(x) = 0$ para todo $x \in X$	Equação 2.8	33
$\mu_a(x) \leq \mu_b(x)$ para todo $x \in X$	Equação 2.9	34
$\mu_{a \cup b}(x) = \max [\mu_a(x), \mu_b(x)]$	Equação 2.10	34
$\mu_{a \cup b}(x) = \mu_a(x) \vee \mu_b(x)$	Equação 2.11	34
$\mu_{a \cap b}(x) = \min [\mu_a(x), \mu_b(x)]$	Equação 2.12	34
$\mu_{a \cap b}(x) = \mu_a(x) \wedge \mu_b(x)$	Equação 2.13	34
(a) $\mu_{a \vee b}$ e (b) $\mu_{a \wedge b}$	Equação 2.14	34
1. Comutatividade: $A \cup B = B \cup A$; $A \cap B = B \cap A$	Equação 2.15	35
2. Idempotência: $A \cup A = A$; $A \cap A = A$	Equação 2.16	35
3. Associativa: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C = A \cup B \cap C$	Equação 2.17	35
$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C = A \cap B \cup C$	Equação 2.18	35
4. Distributividade: $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$	Equação 2.19	35
$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$	Equação 2.20	35
5. Absorção: $A \cup (A \cap B) = A$	Equação 2.21	35
$A \cap (A \cup B) = A$	Equação 2.22	35
6. $A \cap \phi = \phi$	$A \cup X = X$ Equação 2.23	35
$A \cup \phi = A$	$A \cap X = A$ Equação 2.24	35
$A \cap \text{comp } A \neq \phi$	$A \cup \text{comp } A \neq X$ Equação 2.25	35
$\mu_R(x, y) = \min \{\mu_A(x), \mu_B(y)\}$	Equação 2.26	36
$\mu_s(x, x) = 1$ (reflexiva)	Equação 2.27	36
$\mu_s(x, y) = \mu_s(y, x)$ (simétrica)	Equação 2.28	36

$\mu_s(x, y) \geq \max_y \{ \min \{ \mu_s(x, y), \mu_s(y, z) \} \}$ (transitiva) Equação 2.29	36
$A \cup B = \max [a_{ij}, b_{ij}] = a_{ij} \vee b_{ij}$ Equação 2.30	37
$A \cap B = \min [a_{ij}, b_{ij}] = a_{ij} \wedge b_{ij}$ Equação 2.31	37
$A \circ B = \max [\min (a_{ij}, b_{ij})]$ Equação 2.32	37
$A \leq B$ existe sss $a_{ij} \leq b_{ij}, \forall i, j$ Equação 2.33	37
$\text{comp } A = [1 - a_{ij}]$ ou $\text{comp } B = [1 - b_{ij}]$ Equação 2.34	37
$\mu_{a \rightarrow b}(x, y) = [\mu_a(x) \wedge \mu_b(y)] \vee [1 - \mu_a(x)]$ Equação 2.35	39
$A_1: x \text{ é } R_1$ Equação 2.36	39
$A_2: x \text{ e } y \text{ são } R_2$ Equação 2.37	39
$A_3: y \text{ é } R_1 \text{ o } R_2$ Equação 2.38	40
$\mu_M(x) = f(x) - \inf(x) / \sup(f) - \inf(x)$ Equação 2.39	40
$\mu_M(x^*) = \sup_{x \in X} [\mu_M(x) \wedge \mu_A(x)]$ Equação 2.40	41
$(f_1, p_1) + (f_2, p_2) = (f_1 + f_2, p_1 + p_2)$, Equação 2.41	49
$P(A_1 A_2 \dots N_a) = P(A_1)P(A_2) \dots P(N_a)$ AND Equação 3.1	57
$P(A_1 + A_2 + \dots + N_a) \cong \sum P(N_a)$ OR Equação 3.2	57
TOP AND GATE1 GATE2 Equação 3.3	61
GATE1 OR FT-N/M-1 FT-N/M-2 FT-N/M-3 Equação 3.4	61
GATE2 OR B1 B3 B4 Equação 3.5	61
GATE3 OR B2 B4 Equação 3.6	61
FT-N/M-1 AND GATE3 B3 B5 Equação 3.7	61
FT-N/M-2 AND GATE3 B1 Equação 3.8	61
FT-N/M-3 AND B3 B5 B1 Equação 3.9	61
GATE1 GATE2 Equação 3.10	61
FT-N/M-1 GATE2 Equação 3.11	62
FT-N/M-2 GATE2 Equação 3.12	62
FT-N/M-3 GATE2 Equação 3.13	62
B3 B5 GATE2 GATE3 Equação 3.14	62
FT-N/M-2 GATE2 Equação 3.15	62
FT-N/M-3 GATE2 Equação 3.16	62
B3 B5 GATE2 GATE3 Equação 3.17	62

B1 GATE2 GATE3	Equação 3.18.....	62
FT-N/M-3 GATE2	Equação 3.19	62
B3 B5 GATE2 GATE3	Equação 3.20	62
B1 GATE2 GATE3	Equação 3.21	62
B1 B3 B5 GATE2	Equação 3.22	62
B2 B3 B5 GATE2 (substitui GATE3 por B2)	Equação 3.23	63
B1 B2 GATE2 (substitui GATE3 por B2)	Equação 3.24	63
B3 B4 B5 GATE2 (substitui GATE3 por B4)	Equação 3.25	63
B1 B4 GATE2 (substitui GATE3 por B4)	Equação 3.26	63
B1 B3 B5 GATE2 (não envolve GATE3)	Equação 3.27	63
B2 B3 B5 B1	Equação 3.28	63
B1 B2 B1	Equação 3.29	63
B3 B4 B5 B1 (substitui GATE2 por B1)	Equação 3.30	63
B4 B1 B1	Equação 3.31	63
B1 B3 B5 B1	Equação 3.32	63
B2 B3 B5 B3	Equação 3.33	63
B1 B2 B3	Equação 3.34.....	63
B3 B4 B5 B3 (substitui GATE2 por B3)	Equação 3.35	63
B1 B4 B3	Equação 3.36.....	63
B1 B3 B5 B3	Equação 3.37	63
B2 B3 B5 B4	Equação 3.38	64
B1 B2 B4	Equação 3.39.....	64
B3 B4 B5 B4 (substitui GATE2 por B4)	Equação 3.40	64
B1 B4 B4	Equação 3.41	64
B1 B3 B5 B4	Equação 3.42	64
B2 B3 B5 B1 = B1 B2 B3 B5	Equação 3.43	64
B1 B2 B1 = B1 B2	Equação 3.44	64
B3 B4 B5 B1 = B1 B3 B4 B5	Equação 3.45	64
B4 B1 B1 = B1 B4	Equação 3.46	64
B1 B3 B5 B1 = B1 B3 B5	Equação 3.47	64

B2 B3 B5 B3 = B2 B3 B5	Equação 3.48.....	64
B1 B2 B3 = B1 B2 B3	Equação 3.49.....	64
B3 B4 B5 B3 = B3 B4 B5	Equação 3.50.....	64
B1 B4 B3 = B1 B3 B4	Equação 3.51.....	64
B1 B3 B5 B3 = B1 B3 B5	Equação 3.52.....	64
B2 B3 B5 B4 = B2 B3 B4 B5	Equação 3.53	64
B1 B2 B4 = B1 B2 B4	Equação 3.54.....	64
B3 B4 B5 B4 = B3 B4 B5	Equação 3.55.....	64
B1 B4 B4 = B1 B4	Equação 3.56	64
B1 B3 B5 B4 = B1 B3 B4 B5	Equação 3.57	64
B1 B2	Equação 3.58	65
B1 B2 B3 eliminado por B1 B2	Equação 3.59	65
B1 B2 B3 B5 eliminado por B1 B2	Equação 3.60	65
B1 B2 B4 eliminado por B1 B2	Equação 3.61	65
B1 B3 B4 eliminado por B1 B4	Equação 3.62	65
B1 B3 B4 B5 eliminado por B1 B4	Equação 3.63	65
B1 B3 B4 B5 eliminado por B1 B4	Equação 3.64	65
B1 B3 B5	Equação 3.65.....	65
B1 B3 B5 corte mínimo repetido	Equação 3.66	65
B1 B4	Equação 3.67	65
B1 B4	Equação 3.68	65
B2 B3 B4 B5 eliminado por B2 B3 B5	Equação 3.69.....	65
B2 B3 B5	Equação 3.70.....	65
B3 B4 B5	Equação 3.71.....	65
B3 B4 B5 corte mínimo repetido	Equação 3.72	65
B1 B2	Equação 3.73	66
B1 B4	Equação 3.74	66
B1 B3 B5	Equação 3.75.....	66
B2 B3 B5	Equação 3.76.....	66
B3 B4 B5	Equação 3.77.....	66

TOP = GATE1 * GATE2 Equação 3.78.....	66
GATE1 = FT-N/M-1 + FT-N/M-2 + FT-N/M-3 Equação 3.79.....	66
GATE2 = B1 + B3 + B4 Equação 3.80	66
GATE3 = B2 + B4 Equação 3.81	66
FT-N/M-1 = GATE3 * B3 * B5 Equação 3.82.....	66
FT-N/M-2 = GATE3 * B1 Equação 3.83	66
FT-N/M-3 = B1 * B3 * B5 Equação 3.84.....	66
TOP = GATE1 * GATE2. Equação 3.85.....	67
TOP = (FT-N/M-1 + FT-N/M-2 + FT-N/M-3) * (B1 + B3 + B4). Equação 3.86	67
TOP = (GATE3*B3*B5+ GATE3*B1+B1*B3*B5)*(B1 + B3 + B5) Equação 3.87 .67	
(B1+B3B4)*[(B2 + B4)(B3*B5)+	
(B2+B4)*B1+B1*B3*B5] Equação 3.88	67
(B1+B3+B4)* (B2*B3*B5+B3*B4*B5+B1*B2+B1*B4+B*B3*B5) Equação 3.89 ..67	
+ B4 *(B2*B3*B5+B3*B4*B5+B1*B2+B1*B4+B1*B3*B5) Equação 3.90	68
+ B1*B2*B4 + B1*B4*B4 + B1*B3+B4*B5 Equação 3.91	68
+ B1*B3*B4*B5 Equação 3.92.....	68
B1*B4 + B1*B3*B4*B5 Equação 3.93.....	69
TOP = B1*B2 + B1*B4 + B1*B3*B5 + B2*B3*B5 +	
B3*B4*B5. Equação 3.94.....	69
+ P[B2*B3*B5] + P[B3*B4*B5] Equação 3.95.....	69
(i) $A = (c, a, b)$. Equação 4.1	73
(ii) $A_i + A_j = (c_i+c_j, a_i+a_j, b_i+b_j)$, Equação 4.2	73
(iii) $A_i - A_j = (c_i-b_j, a_i-a_j, b_i-c_j)$ Equação 4.3	73
(iv) $-A_j = (-b_i, -a_i, -c_i)$, espec. $\sim 1 = (1, 1, 1)$ e $\sim 1 - A_j = (1-b_j, 1-a_j, 1-c_j)$	
Equação 4.4	73
(v) $A_i \times A_j = (c_i c_j, a_i a_j, b_i b_j)$, por aproximação Equação 4.5	73
$(1 - k) [1 - (x_2 - c_i) / (x_2 - x_1 + a_i - c_i)]$. Equação 4.6	73
$x_1 = \min \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ e $x_2 = \max \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$. Equação 4.7	73
$P_T^A = P_{E1} \times P_{E2} \times \dots \times P_{En}$ Equação 4.8	74
$P_T^{\sim 1} = \sim 1 - (\sim 1 - P_{E1}) \times (\sim 1 - P_{E2}) \times \dots \times (\sim 1 - P_{En})$, Equação 4.9	75

onde $\sim 1 = (1, 1, 1)$. Equação 4.10	75
$D(P_T, P_{Ti}) = R(P_T, P_{Ti})$ Equação 4.11	75
$Q = f(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n)$ Equação 4.12	79
$\max[0, 1 - (x - x_1)/(x_2 - x_1)], x_1 \leq x \leq x_2$, Equação 4.13	80
1, $x = x_2$, Equação 4.14	80
$\max[0, 1 - (x_3 - x)/(x_3 - x_2)], x_2 \leq x \leq x_3$, Equação 4.15	80
0, outra situação, Equação 4.16	80
$\mu_X(x_2) = 1$, Equação 4.17	80
$\mu_X(x_1) = \mu_X(x_3) = 0$, Equação 4.18	81
$x_1 = q_p/EF$ Equação 4.19	81
$x_2 = q_p$, Equação 4.20	81
$x_3 = q_p \cdot EF$, Equação 4.21	81
$Q_{qi=0} = f(q_1, q_2, \dots, q_{i-1}, 1, q_{i+1}, \dots, q_n)$ Equação 4.22	82
$Q_{qi=0} = f(q_1, q_2, \dots, q_{i-1}, 0, q_{i+1}, \dots, q_n)$ Equação 4.23	82
$FIM = ED[Q_{qi=1}, Q_{qi=0}]$, Equação 4.24	82
$ED[A, B] = \sum ((a_L - b_L)^2 + (a_U - b_U)^2)^{0.5} \alpha_i$ Equação 4.25	82
$FUIM = ED[Q, Q_i]$, Equação 4.26	83
G1 OR E1 G2 Equação 6.1	117
G2 AND G3 G4 Equação 6.2	117
G3 OR G5 E2 E3 E4 Equação 6.3	117
G4 OR G6 E4 E5 E6 Equação 6.4	117
G5 AND E6 E9 Equação 6.5	117
G6 AND E7 E8 Equação 6.6	117
E1 Equação 6.7	118
E4 Equação 6.8	119
E9 E6 Equação 6.9	119
E2 E9 Equação 6.10	119
E2 E5 Equação 6.11	119
E3 E9 Equação 6.12	119
E3 E5 Equação 6.13	119

E2E7E8	Equação 6.14.....	119
E3E7E8	Equação 6.15.....	119
G1 AND G2 G3	Equação 6.16.....	122
G2 AND G4 G5	Equação 6.17.....	122
G3 AND G6 G7	Equação 6.18.....	122
G4 OR G8 G12 G16	Equação 6.19.....	122
G5 OR G9 G13 G18	Equação 6.20.....	122
G6 OR G10 G14 FC	Equação 6.21.....	122
G7 OR G11 G15 FC	Equação 6.22.....	122
G8 OR G16 G17	Equação 6.23.....	122
G9 OR G18 G19	Equação 6.24.....	122
G10 OR G20 FT	Equação 6.25.....	122
G11 OR G20 FT	Equação 6.26.....	123
G12 OR G21 G22 VS1 VG	Equação 6.27.....	123
G13 OR G23 G24 VS4 VG	Equação 6.28.....	123
G14 OR G25 G26 VS3 VG	Equação 6.29.....	123
G15 OR G27 G28 VS2 VG	Equação 6.30.....	123
G16 OR MS1 MD12	Equação 6.31.....	123
G17 OR BS1 FD-FCC BG	Equação 6.32.....	123
G18 OR BS3 FD-FCC BG	Equação 6.33.....	123
G19 OR MS2 MD12	Equação 6.34.....	123
G20 OR BS2 FD-FCC BG	Equação 6.35.....	123
G21 OR VD12 VD14	Equação 6.36.....	123
G22 OR VT123 VT134 VT124	Equação 6.37.....	123
G23 OR VD14 VD24 VD34	Equação 6.38.....	123
G24 OR VT124 VT134 VT234	Equação 6.39.....	123
G25 OR VD13 VD23 VD34	Equação 6.40.....	123
G26 OR VT123 VT134 VT234	Equação 6.41.....	123
G27 OR VD12 VD23 VD24	Equação 6.42.....	123
G28 OR VT123 VT124 VT234	Equação 6.43.....	123

G29 OR BD12 BD13	Equação 6.44	123
G30 OR BD12 BD23	Equação 6.45	123
G31 OR BD13 BD23	Equação 6.46	123
G1-loss-of-safety AND G2-2935Pas G3-2969-Pass LAC-Power	Equação 6.47	129
G2-2935-Pass OR G4-D2-US2 2935-Pre-Closed Missile-Traj	Equação 6.48	129
G3-2969 OR 2969-Pre-Closed Prearm-Random AMAC-Input	Equação 6.49	129
G4-D2-US2 AND TSSG-Sw-Pre Traj-Correct-Ran	Equação 6.50	129
G1-loss-of-safety =	Equação 6.51	131
G1 AND G2 G3	Equação 6.52	132
G2 OR G4 G5 G7	Equação 6.53	132
G3 OR B1 B3 B4	Equação 6.54	132
G4 AND G6 B1	Equação 6.55	132
G5 AND G6 B3 B5	Equação 6.56	132
G6 OR B2 B4	Equação 6.57	132
G7 AND B1 B3 B5	Equação 6.58	132
B1 B2	Equação 6.59	133
B1 B4	Equação 6.60	134
B1 B3 B5	Equação 6.61	134
B2 B3 B5	Equação 6.62	134
B3 B4 B5	Equação 6.63	134

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação.

Confiabilidade e Sistemas Fuzzy.

Este trabalho tem por objetivo aplicar os conceitos da teoria de conjuntos fuzzy na análise de confiabilidade motivado por diversas razões.

O método probabilístico é utilizado na análise de confiabilidade. A taxa de falha e a taxa de erro são conceitos importantes na confiabilidade do equipamento e na confiabilidade humana. Entretanto, afirma-se que o julgamento humano mantém uma posição central em todas as análise de segurança do sistema complexo técnico, ou seja:

- (1) Existe a necessidade de coleta de dados para estimar a taxa de falha e taxa de erro. Na prática, os dados coletados não são suficientes para estimar estas taxas. Sendo assim, estas taxas são estimadas baseadas em opiniões de especialistas. Logo, as “probabilidades fuzzy” são propostas para avaliação de risco.
- (2) A confiabilidade dos equipamentos e a confiabilidade humana são afetadas por vários motivos, como é o caso do ambiente no qual estes equipamentos são acondicionados para operação, as condições ambientais de operação, o esgotamento psicológico de um operador, são apenas alguns. Na análise de confiabilidade convencional, a taxa de falha do evento básico e a taxa de falha humana básica são ajustadas por especialistas baseadas em critérios de julgamento de forma a considerar o efeito de muitos fatores sobre confiabilidade.
- (3) A dependência entre funções ou unidades é realmente importante para o resultado da análise de confiabilidade. Com relação a análise de confiabilidade humana Swain e Guttman recomendam um modelo de dependência. Este modelo expressa a dependência entre tarefas consecutivas utilizando uma escala de cinco níveis: dependência zero, baixa dependência, dependência moderada, alta dependência, e dependência completa. A taxa de erro humana é ajustada através de fórmula de

acordo com o nível de dependência. Entretanto este nível é determinado pelo julgamento de especialistas. O mesmo pode ser afirmado em relação aos componentes do sistema.

- (4) A determinação do critério de segurança, da mesma forma, é estabelecido baseado na opinião de especialistas.

Resta considerar que em alguns problemas na análise probabilística de segurança

- (5) certos casos consideram confiabilidade do equipamento e confiabilidade humana na análise de confiabilidade do sistema. Entretanto a definição da taxa de falha é diferente da taxa de falha de erro. Sendo assim é muito importante analisar a confiabilidade de sistemas considerando as duas taxas de erro.

- (6) Muitas sequências possíveis de um gerador de eventos para um sistema de acidentes são consideradas para analisar a confiabilidade do sistema. A árvore de falhas é um exemplo. A seleção de sequências é novamente dependente do julgamento de um especialista. E em geral existe a necessidade de expressar as sequências qualitativamente à partir de certos pontos de vista.

- (i) A relação entre confiabilidade e fatores afetando a confiabilidade não é necessária e suficiente. Sendo assim é difícil expressar claramente este tipo de relação.

- (ii) O grau de incerteza se a falha do equipamento ou erro humano conduz à um sistema de acidente não pode ser expressa claramente, mas é comparativamente fácil expressar este tipo de incerteza qualitativamente. Este tipo de incerteza é observada em um sistema complexo como em uma instalação nuclear de potência.

- (iii) É difícil analisar a confiabilidade, especialmente a humana, microscopicamente. Sendo assim, é necessário analisar a confiabilidade do ponto de vista macroscópico. A expressão qualitativa de sequências implica na análise macroscópica de confiabilidade.

A expressão qualitativa é útil para avaliação do risco, mas muitos termos vagos são encontrados na expressão. Este tipo de abordagem só pode ser feita pela metodologia fuzzy. O método probabilístico não pode lidar com conhecimento impreciso.

Fica claro então que, a teoria fuzzy é essencial para análise de confiabilidade, tratamento de incertezas e determinação de componentes críticos.

Análise de Incertezas.

O trabalho mais recente, 1996, é o dos autores P. V. Suresh, A. K. Babar, e V. Venkat Raj [37], onde assuntos do tipo Análise de Incerteza, Análise de Árvore de Falha, Teoria Fuzzy, Medida de Importância e Simulação de Monte Carlo são suas principais preocupações. Neste trabalho, os autores consideram que a análise de árvore de falha, as incertezas na probabilidade de falha e/ou taxa de falha dos componentes do sistema ou eventos básicos podem ser propagados para encontrar a incerteza na probabilidade de falha do sistema total. O estudo convencional é a simulação de Monte Carlo considerando a distribuição de probabilidade para a probabilidade de falha. Em contribuição, uma nova metodologia baseada na teoria Fuzzy pode ser utilizada na análise de árvore de falha para quantificar as incertezas nos eventos básicos e daí propagá-las ao longo da árvore. Entretanto, a identificação dos componentes os quais possuem contribuição máxima para a probabilidade de falha do sistema é da mesma forma importante na análise de árvore de falha. Semelhantemente, a ordenação dos componentes baseado na sua contribuição da incerteza para a incerteza da probabilidade de falha do sistema é igualmente importante. Foi apresentado uma comparação entre a metodologia probabilística e a possibilística para avaliação da incerteza do evento topo. Além disso, explora um forma de ordenar os componentes do sistema ou eventos básicos dependendo sobretudo (1) de suas contribuições para a probabilidade de falha do evento topo e (2) de sua contribuição na incerteza para determinação da incerteza no evento topo baseada na teoria fuzzy.

A Importância do Trabalho de Tese.

O presente trabalho foi desenvolvido buscando oferecer uma perspectiva mais poderosa de Análise de Confiabilidade, construindo um ambiente computacional que

faça uso de uma abordagem específica, utilizando a informação imprecisa ou mesmo a ausência dela, para sistemas de segurança em instalações Nucleares de Potência e/ou industriais em geral, como é o caso de plantas de Petróleo.

Atualmente, os estudos sobre Análise Probabilística de Segurança para Angra I, nível 1, estão sendo realizados, e carecem de uma metodologia apropriada para avaliar a confiabilidade dos sistemas considerados como de segurança, tanto para situações em que exista falta total de informação sobre os componentes ou da não confiabilidade dos dados envolvidos nos cálculos.

A definição da sequência de eventos ("event tree"), com seus eventos precursores, necessita para seus cálculos, de resultados provenientes de estudos realizados com Árvores de Falhas. Estas árvores, são utilizadas na maioria das vezes, com dados genéricos definidos para seus eventos básicos. De maneira convencional, é preciso que se tenha um histórico completo de operação da planta em questão, para se obter dados confiáveis sobre taxas de falhas dos eventos terminais. o que nem sempre é fácil de se obter. Por isso, existe uma grande necessidade do desenvolvimento de uma metodologia, que possa superar esta dificuldade em se obter informações confiáveis sobre estes eventos, e que esteja voltada para determinação das probabilidades dos eventos topo destas árvores de falhas empregadas durante a análise de confiabilidade da planta.

Já nos estudos em plataforma de petróleo, alguma coisa tem sido feita para diagnóstico em tempo real e muito pouco para confiabilidade de sistema. É muito importante este tipo de estudo, pois os resultados confiáveis, permitem desenvolver um processo muito importante para a vida operacional desta ou de qualquer outra instalação industrial, que é o processo de manutenção. Toda uma política de manutenção preventiva ou preditiva pode ser desenvolvida, evitando com isso, constante paradas, causando danos financeiros incalculáveis. Isto não quer dizer que não exista a necessidade de um projeto de diagnóstico em tempo real, e sim, que qualquer instalação deste porte, Central Nuclear de Potência ou Plataforma de Petróleo, tenha não um ou outro, mais os dois projetos desenvolvidos.

Portanto, é altamente recomendável, que estudos como este possam ser realizados, no sentido de ampliar o espectro de análises.

1.2 - Objetivos.

O objetivo principal do presente trabalho é implementar em um ambiente computacional, a metodologia de análise de incerteza. Para isso, a primeira etapa é transformar estas idéias numa representação de algoritmos. Será utilizado o ambiente de programação Delphi, onde permite a elaboração de uma interface visual e a utilização de programação orientada à objetos. Depois de elaborado este aplicativo, serão utilizados para efeito de verificação e validação do aplicativo desenvolvido, casos reais de acidentes, com dados especializados, em instalações nucleares de potência. Os resultados obtidos serão analisados e comparados com estudos anteriormente desenvolvidos, visando primeiro, sugestões e recomendações de modificações ou alterações nas especificações de projeto de uma planta de engenharia, e em segundo, sugerindo que o aplicativo seja utilizado em análises posteriores, onde se faça necessário uma metodologia confiável e segura.

1.3 - Revisão Bibliográfica.

CORTES MÍNIMOS (“minimal cut sets”)

Em 1975, um pequeno curso sob o título de Análise de Confiabilidade e Sistema de Segurança, foi apresentado nos Estados Unidos da América (USA) e num espaço curto de tempo cerca de 200 pessoas da NRC - “Nuclear Regulatory Commission”, já haviam participado. O curso foi apresentado por David F. Haals, “Institute of System Sciences”, Professor Norman H. Roberts, “University of Washington”, e membros do Grupo de Análise Probabilística de Segurança, NRC,

como parte de um programa de treinamento coordenado pelo Grupo de Análise Probabilística de Segurança.

Como resultado foi produzido um manual [38], que deveria não só servir como um texto para o curso de Confiabilidade e de Sistema de Segurança, mas colocar disponível para outros usuários material relevante sobre avaliação e construção de árvore de falhas. A publicação deste guia ficou de acordo com as recomendações constantes no documento do Grupo de Revisão de Avaliação do Risco (NUREG/CR-0400) no qual estabelecia que as metodologias de árvore de falha/evento poderiam e deveriam ser utilizadas mais extensivamente pela NRC. Surgia então um dos documentos mais importantes e utilizados até hoje em dia sobre Árvore de Falhas.

Por volta de 1980, surgia o segundo documento mais importante e também utilizado até os dias de hoje em cursos regulares a nível universitário. O livro editado por MacCormick [53] veio com uma proposta mais ampla: a de estudar Análise de Risco à população vizinha às instalações nucleares ou de diferentes formas de tecnologias. De forma a quantificar a probabilidade por unidade de tempo com que um determinado evento indesejável ocorra, os fundamentos da engenharia de confiabilidade seriam necessários para quantificar a frequência esperada com a qual estes eventos deveriam inicializar. Por esta razão os conceitos de confiabilidade e de análise de risco foram apresentados juntos neste livro, muito embora a análise de confiabilidade seja importante em seu próprio domínio para o estudo de disponibilidade de uma instalação de potência.

Daí em diante, e impulsionada pela indústria nuclear como a principal responsável na época, seguida por outras formas de tecnologias e mais recentemente por estudos na NASA, o uso da metodologia de árvores de falha/evento desempenhou grande importância nos trabalhos, envolvendo a confiabilidade de sistemas de segurança e análise de risco à sociedade, que se seguiram ao longo da década de 80 até os dias de hoje. Poderíamos citar, baseado em pesquisas feitas recentemente em apenas uma base de dados internacional, a existência de um número não menor do que cerca de 200 trabalhos sobre Árvore de Falhas. Mas, como nosso objetivo é encontrar publicações relevantes e se possível utilizar suas metodologias e/ou conclusões

apresentadas a cerca de árvore de falhas e cortes mínimos combinados com Lógica Fuzzy, naturalmente o conjunto de trabalhos publicados em revistas internacionais e nacionais especializadas ou documentos outros sobre o assunto, reduz em número e estão apresentados neste trabalho de tese.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos em 1980, constituindo-se no “boom” da área, e estão apresentados a seguir de forma retrospectiva sem a preocupação no momento de discutir cada modelo e suas conclusões.

Inicialmente, C. Singh [1], apresentou um método denominado de MCS - “Markov Cut Set”, para sistemas envolvendo dependência-s (s- estado i do sistema). O método é baseado no teorema MCS e consiste em decompor o sistema por cortes utilizando o processo de Markov para calcular termos nas equações de cortes. O processo de Markov associado com somente membros de um corte necessita ser considerado no tempo e a matriz da taxa de transição do sistema inteiro não precisa ser gerada.

O MCS é utilizado quando $Pr\{nC\}$ - probabilidade e $F\{S\}$ - frequência de encontrar S , são calculados da matriz da taxa de transição dos membros de C_i - corte mínimo. Isto é possível quando se aplica o teorema MCS e a MP- Markov process, do sistema inteiro pode ser modificado para obter o MP de C_i . Entretanto, em muitos casos onde o teorema MCS rigorosamente não se aplica, resultados aproximados podem ainda serem possíveis pelo método MCS. O jugamento em tais casos é baseado em aproximadamente como o teorema MCS se aplica.

Em Mitchell O. Locks [2], o propósito é o de avaliar estudos alternativos para estimar a confiabilidade do sistema. Três diferentes maneiras de estimar a confiabilidade de um sistema s-coerente são comparados: 1) produto disjuntivos recursivos (DP), 2) exclusão-inclusão repetida (IE), e 3) aproximações de corte mínimo baseado em informações parciais. Os três pontos são apresentados:

1. DP repetida e IE repetida são matematicamente idênticos e se obtém os mesmos valores numéricos para cada fase da repetição, a despeito das funções de confiabilidade do sistema repetido serem diferentes.

2. DP repetido parece resultar em poucas comparações e um reduzido polinômio do que repetido IE, e então trabalho reduzido, para um sistema em escala menor, tais como 2 de 4: exemplo G discutido no trabalho. Ele não sabe se esta vantagem comparativa persiste para sistemas grandes.

3. Para sistemas de confiabilidade altamente complexos, aproximações de corte mínimo baseada em informações parciais, comprometendo o resultado e de fácil computação são preferíveis se comparados a métodos exatos de caminho mínimo, desde que as aproximações adotadas venham se tornar muito próximas de valores reais da confiabilidade e com pequeno esforço comparativamente, em alguns casos exigindo somente cálculos feito à mão.

Em Inagaki e Henley [3], o trabalho foi desenvolver um método rigoroso para obter 1) probabilidade existente (índisponibilidade) e 2) a intensidade (número s- esperado de ocorrências por unidade de tempo) de ocorrência (falha) incondicional para implicants primeiros e eventos topo para sistema não coerente. É ressaltado que as investigações de manutenção e reparo para sistemas não-coerentes devem ser cuidadosamente formuladas, considerando que o reparo de componentes pode, por exemplo, conduzir a falha do sistema.

Em Apostolakis e Chu [4], Os Métodos para Análise Probabilística de Árvore de Falhas Não-Coerente, consistiu em desenvolver quatro métodos para a análise probabilística de árvore de falhas s-coerente, relativos à sua aplicabilidade para árvore de falhas não-coerente. Os limites máximos/mínimos e inclusão/exclusão podem ser estendidos para árvore de falhas não-coerente. Quando uma árvore de falhas é modularizada, a aplicação de limites máximos/mínimos ou limites superiores de inclusão/exclusão para ambos os módulos e as funções estruturadas organizadas produzem o mesmo limite que são obtidos sem a decomposição modular. Se as funções estruturadas organizadas ou módulos são suficientemente simples, soluções exatas podem ser realizadas ao nível de fornecer um limite otimizado.

Em James M. Cargal [5], Uma Algebra Alternativa para Árvore de Falhas, descreve uma álgebra que complementa a álgebra Booleana, e na qual pode ser útil para sistemas não coerente. Esta álgebra envolve uma manipulação substancialmente

reduzida, se comparada àquela realizada com a Booleana, e é conveniente para descrever operações OU-exclusivo.

Em Rai e K.K. Aggarwal [6], Complementação aos Cortes Mínimos e Caminhos Mínimos, aparece a sugestão para gerar os cortes mínimos de caminhos mínimos, ou vice-versa, de um sistema s-coerente. Neste método, o caminho polinomial é expressado de forma particular e então são necessários complementos as funções Booleana mais simples.

Em Métodos de Decomposição para Análise de Árvores de Falhas [7], de Arnon Rosental, o propósito é o de apresentar um cálculo computacional sobre árvores de falha. Alguns tipos de árvores de falha são descritas nas quais são inadequadas a enumeração dos cortes mínimos. A Modularização conduz a uma forma mais eficiente de programar, e também de identificar subsistemas os quais sejam significativos. O problema de encontrar todos os módulos de uma árvore de falha é formulado como uma extensão do problema de encontrar todos os pontos de corte de um grafo indiretamente. A melhor forma é um programa escrito em FORTRAN (disponível como um suplemento) o qual pode encontrar módulos de uma árvore de falha com 1000 eventos em tempo reduzido, da ordem de segundos.

O propósito de Locks [8], junho 1980, são comentários sobre um trabalho, com réplicas e resposta. O algoritmo de K&H para determinar os implicantes-primos (Prime Implicants) de uma árvore de falha não-coerente é muito longo e complicado para o propósito. O exemplo que foi utilizado por K&H para ilustrar o algoritmo é retrabalhado com métodos conhecidos para mostrar que alternativas se encontram disponíveis exigindo menos esforços.

Esta correspondência é uma série de 4 cartas publicadas como uma resposta à publicação de Kumamoto & Henley (K&H), que apresenta um algoritmo baseado na análise "topdown" particularmente definido para árvores de falha não-coerentes. A primeira é de Locks, declarando que o artigo é muito complicado, e que um procedimento mais reduzido se encontra disponível. É acompanhado de uma réplica #1 feita por Ogunbiyi e a réplica #2 por K&H. A nota final é concluída com uma resposta de Locks para ambas as réplicas.

Neste trabalho de Nanda [9] é apresentado uma Aplicação de uma Identidade Booleana para Árvores de Falha. Neste artigo foram discutidas várias condições de que existe nas árvores de falha a possibilidade de aplicação de uma identidade Booleana do tipo $X_i X_j + X_i \bar{X}_j = X_i$. Ficou algebricamente provado que esta identidade não é exigida se precedida por $X_i + X_i X_j = X_i$, e $X_i X_j + X_i X_j = X_i X_j$, na simplificação de expressões lógicas de árvore de falhas, ou por outro lado se a árvore de falhas tiver um arco redundante.

Em abril de 1980, Mitchell Locks [10] havia publicado “The Fail-Safe Feature of the Lapp&Powers Fault Tree”, cujo propósito era o de considerar os estados do sistema seguro-falho. Em resposta à sugestão do Editor, 3 estados do modelo de árvore de falha do “Lapp & Powers” foram recomendados: bom, seguro falhado e inseguro falhado. Ambas as funções de probabilidade e lógica são dadas separadas para ambos os eventos bom e seguro falhado, bem como os cálculos de probabilidades. Um exemplo simplificado de dois componentes é discutido para ilustrar a relação entre os portões “XOR” nas árvores de falha e sistemas e subsistemas seguros falhos.

Em abril de 1980, P. K. Andow [11], realizou um trabalho cujo propósito é o de explorar áreas de problema em “Difficulties in Fault-Tree Synthesis for Process Plant”. Este trabalho identifica um número de dificuldades relacionadas, algumas das quais sem soluções ainda. A atenção é dada para falhas no tipo de modelo de fluxo-pressão comumente utilizado na literatura. Foram encontradas dificuldades quando os algoritmos publicados são aplicados para controle de circuitos. Foram apresentados exemplos para os casos de controle em cascata e simples. De um total de 8 conclusões, 5 foram destinadas as dificuldades encontradas pelo uso da metodologia de árvore de falha.

Mitchell O. Locks [12], em dezembro de 1981, retornou com “Modularizing, Minimizing, and Interpreting the K&H Fault-Tree”. Seu propósito é o de modularizar e minimizar a árvore de falha e seus inversos. A verificação feita por Worrel & Stack (W&S) dos resultados previamente obtidos por Kumamoto & Hanley (K&H) para uma árvore de falha de um sistema s-não coerente e seus inversos e suas correções de três

erros nas árvores permite a possibilidade de simplificar a análise utilizando módulos; isto facilita as operações algébricas, desde que ambos grupos sejam descritos economicamente em suas formas mínimas, um subgrupo dos implicantes primos.

Em 1983 surge um novo conceito de determinação de cortes mínimos. David J. Finnicum e Peter W. Rzasa [13], ambos da “Combustion Engineering, Inc”. desenvolvem um algoritmo baseado em linguagem LISP para geração de cortes mínimos utilizando redução booleana. O objetivo futuro é de um projeto com um código de avaliação e geração automática de árvore de falha baseado em regras.

Mantendo uma sequência de publicações em termos de datas, em outubro de 1985 e abril 1986 surgem respectivamente [17, 18, 19 e 20].

Em D. R. Shier and D. E. Whited [17], “Algorithms for Generating Cutsets by Inversion”, o propósito é o de sugerir um novo algoritmo. É uma contribuição ao estudo do problema de inversão dos caminhos mínimos para obter os corte mínimos (ou vice-versa) para sistemas s-coerente. Os resultados teóricos conduzem a inversão simplificada por um método sequencial. Algumas estratégias são discutidas para implementar estas simplificações de forma eficiente. Resultados computacionais, obtidos aplicando-se os algoritmos para problemas padrões retirados da literatura, indicam que uma redução substancial em tempo computacional são alcançadas utilizando-se estas simplificações propostas.

Com G. B. Jasmon [18], o propósito é de apresentar um novo algoritmo. O conceito de caminho mínimo básico é sugerido, e apresentado a descrição de sua utilização para determinar os cortes mínimos. O trabalho enfatiza dois importantes aspectos sobre caminhos mínimos: 1) a dedução de cortes mínimos ligados de cortes mínimos nós, e 2) a redução de requisitos computacionais na dedução de caminhos mínimos básicos utilizando a decomposição da rede.

Em J. M. Wilson [19], “Modularizing and Minimizing Fault Trees”, o propósito é de apresentar uma técnica totalmente nova. A análise de uma árvore de falha proposta por Locks mostrou que a parte computacional seria facilitada modularizando a árvore de falha. Este processo envolve cálculos feito à mão e conhecimento do analista. Muitos algoritmos computacionais para minimizar uma

árvore de falha requer um método forte no qual conduz esforços computacionais. Estudos nos quais simplificam uma árvore por inspeção e cálculo manual pode frequentemente serem programados e forma uma ferramenta útil para fase de pré-análise de uma árvore de falha. Este trabalho demonstra que o processo de modularizar pode ser organizado por um programa computacional simples no qual pode analisar rigorosamente a árvore de falha antes de se utilizar um programa de minimização mais sofisticado. Os métodos permitem alguns dos benefícios de inspeção para ser incorporado em um programa computacional.

Em abril de 1986, Karl Stecher [20], apresentou um novo algoritmo. Até aquela data, segundo o autor, na análise de árvore de falha de sistemas, o algoritmo mais utilizado para avaliação de árvores de falhas com eventos repetidos, aplica o método de cortes mínimos. Considerando que os cortes mínimos aumentam exponencialmente com o número de componentes do sistema, técnicas de otimização e “truncagem” devem ser utilizadas para avaliar grandes árvores de falha.

Neste trabalho foi apresentado um algoritmo que combina o algoritmo de subida (“bottom-up”) para árvores de falha sem eventos repetidos com algoritmos de descida (“top-down”) para estabelecer a função estrutura de uma árvore de falha com eventos repetidos. Convenientemente, o algoritmo permite modelar e avaliar grandes árvores de falha com eventos repetidos e determinar as características de confiabilidade exatas, tais como estado estacionário e indisponibilidade de sistemas dependente no tempo e taxas de falha para sistemas reparáveis e não-reparáveis.

Este algoritmo foi implementado em programa computacional e utilizado no “Power Engineering and Automation Group of Siemens AG”. O programa inclui muitas características da descrição e de estruturas modular de árvores de falha, por ex.,

1. Definição dos módulos da árvore de falhas, nos quais podem ser declarados como árvores de transmissão repetidas.
2. Uma sub-árvore pode ser utilizada diversas vezes como uma árvore de transmissão, representando muitos módulos do sistema.
3. Eventos repetidos com relação à uma nível da sub-árvore.

Uma grande vantagem é que o usuário do programa não precisa ele próprio se preocupar com os eventos repetidos que aparecem em diferentes sub-árvores. A estrutura do sistema pode ser conduzida dentro de um sistema de árvores de falha subsidiárias as quais podem ser mutuamente dependentes, análogo as características do sistema. O importante é que, não é necessário determinar os cortes mínimos; o algoritmo não suporta a identificação de cortes mínimos dominantes. Esta desvantagem pode ser particularmente balanceada pela análise das características de confiabilidade dos portões e da contribuição dos componentes do sistema de confiabilidade.

O algoritmo combina os métodos usuais de otimização do processo de avaliação sem esforços adicionais, tais como decomposição, técnicas de expansão, ou modularização. Está habilitado de forma muito eficientemente manipular grandes árvores de falha, especialmente se o sistema contém diversos sub-sistemas com estrutura semelhantes.

Em 1987 [14, 15 e 16], surge o casamento entre a metodologia de Árvore da Falha e Sistema Especialista dentro do contexto de Inteligência Artificial.

Nesta época a metodologia de Árvore de Falha é utilizada extensivamente na análise de risco probabilístico de centrais nucleares de potência. Através dos resultados apresentados no trabalho de Bjorn Frogner [16], pode-se ver que o uso de sistemas especialistas pode melhorar o contexto da construção de árvores de falha. Simplifica a árvore de falha e permite incorporar o conhecimento e a experiência de um operador. por exemplo. Em particular, a tecnologia de sistemas especialistas é altamente efetiva e proporcionar consistência através da árvore fornecendo assistência especializada na resolução de circuitos lógicos.

"Incorporating Fuzzy Data and Logical Relations in the Design of Expert Systems for Nuclear Reactors" [15] aplica o método de obter probabilidade na teoria de Dempster-Shafer (DST) para os componentes de sistemas especialistas baseado em regras utilizado em consequências e nas próprias regras. Desde 1985, DST tem recebido especial atenção de pesquisadores em Inteligência Artificial que estudam raciocínio e representação do conhecimento e incertezas associadas, e de tal forma rivalizando com a teoria FUZZY no paradigma da incerteza. Maiores detalhes sobre

este método, pode ser verificado em outro trabalho do mesmo autor, sob o título de "Uncertainty Analysis of Rule-Based Expert Systems with Dempster-Shafer Mass Assignments" [44], de 1988.

Weisbin [14] e outros, revê a teoria de cortes mínimos e demonstra sua aplicação com um exemplo. O estudo de corte mínimos utiliza a forma normal disjuntiva da álgebra Booleana e vários operadores booleanos para simplificar as estruturas de árvores muito complicadas compostas de portões **AND/OR**. O processo de simplificação é automático e é realizado separadamente utilizando códigos computacionais existentes para implementar a redução booleana para valores finitos de grandes árvores. Com este estudo, o sistema de diagnóstico em tempo real cujo tempo de resposta é crítico, determinará diretamente se um objetivo é alcançado comparando-se o estado do sistema atual à um grupo armazenado de elementos preprocessado de estado crítico.

Em abril de 1986, Thomas Feo [21], apresentou um novo código computacional, "Program for the Analysis of Fault Tree", denominado de PAF F77 e utiliza linguagem fortran 77. Definida a estrutura de uma árvore de falha e a probabilidade ou taxas de falha de seus eventos básicos, PAFT F77 calcula as probabilidades do Evento Topo e de seus eventos intermediários, bem como a importância de todos eventos básicos. Quando os dados de entrada são apresentados em forma de taxas de falha e não de probabilidades, as taxas de ocorrência de todos eventos básicos e a taxa de ocorrência do evento topo são então calculadas. O programa foi desenvolvido para utilizar árvores reduzidas e com eventos básicos repetidos. São apresentadas uma breve revisão teórica de análise de árvore de falha juntamente com os comentários sobre a capacidade e limitações do programa computacional desenvolvido.

Os primeiros trabalhos sobre árvore de falha utilizando a metodologia de orientação à objeto (OOP), surge através da publicação de Patterson-Hine e Koen [22]. O propósito é o de apresentar um novo método para avaliação de árvores de falha. A técnica de programação orientada à objeto (OOP) é utilizada em um algoritmo para avaliação direta de árvores de falha. O algoritmo combina o procedimento simples do tipo subida ("bottom-up") para árvores de falha sem eventos repetidos com um

procedimento recursivo top-down para árvores com eventos repetidos. O estudo de orientação à objeto resulta em uma modularização dinâmica da árvore para cada passo no processo de redução. O algoritmo reduz o número de chamadas repetidas exigidas para solucionar árvores com eventos repetidos, e calcular resultados intermediários bem como a solução do evento topo. Os resultados intermediários podem ser reutilizados, se parte da árvore é modificada. Um pequeno exemplo é apresentado de forma a comparar os resultados obtidos entre o algoritmo implementado utilizando técnicas convencionais e àqueles decorrente da implementação OOP.

Em 1990, D. Singer [35], publicou “A Fuzzy Set Approach to Fault Tree and Reliability Analysis”, onde a análise de confiabilidade e de árvore de falha não fornece visão relativa as tolerâncias dos valores perigosos da probabilidade. Para corrigir esta falha, as frequências relativas dos eventos básicos são consideradas números fuzzy. Utilizando aproximações padrões para as funções de pertinência, *n*-ary possibilística dos operadores AND, OR e NEG são derivadas permitindo uma avaliação direta das frequências de eventos perigosos no sistema complexo, simultaneamente com com suas tolerâncias. Este trabalho apresenta o uso destes operadores para construir a árvore possibilística. Um problema real é utilizado para demonstrar o método.

No trabalho de Rasool Kenarangui [23], em abril de 1991, surge uma proposta em forma de tutorial para Análise de Árvore de Eventos utilizando Lógica Fuzzy. Este trabalho é citado aqui objetivando esclarecimentos iniciais quanto aos estudos de determinação de Sequências de Acidentes, pois é o passo seguinte ao estudo de árvores de falha, dentro do processo geral de Análise de Risco em instalações nucleares ou da indústria convencional. Por outro lado, expande a idéia de utilização de Lógica Fuzzy dentro da metodologia de Análise de Risco.

Durante a análise convencional de árvores de falha, probabilidades e consequências são tratadas com valores exatos. Em muitas aplicações de engenharia, entretanto, é difícil avaliar as probabilidades e consequências de experiências passadas, devido ao ambiente dinâmico dos sistemas, e especialmente devido a situações onde existe ausência total de experiências passadas. A lógica Fuzzy, mais uma vez, é utilizada no sentido de tratar da imprecisão e incertezas nos dados durante a utilização

da análise de árvores de evento. A árvore de evento fuzzy possibilita a utilização de variáveis linguísticas para as probabilidades e para as consequências; tais como muito alta, moderada, e baixa probabilidade. A técnica permite avaliar primeiro a parte qualitativa para depois auxiliar nos resultados obtidos na parte quantitativa da análise. A aplicação da árvore de evento fuzzy é demonstrada utilizando um exemplo, sistema de proteção de potência elétrica, no sentido de viabilizar o método em situações complexas. Devido a complexidade dos cálculos, um algoritmo computacional foi desenvolvido e implementado.

Segue-se uma fase mais decisiva, quanto a utilização de Lógica Fuzzy em diversos trabalhos de Árvore de Falhas, Sistemas Especialistas e outros. Nos trabalhos de Mihaela Ulieru, pode-se verificar tal comprovação, pois um número de trabalhos significativos são apresentados em diferentes congressos nos anos de 1992, 1993 e 1994, todos envolvendo a utilização de Lógica Fuzzy. Citam-se apenas três destes trabalhos.

Em “Processing Fault-Tree by Approximating Reasoning” [24], Ulieru inicializa fazendo um salto das técnicas convencionais de Inteligência Artificial (IA) para métodos baseados em lógica Fuzzy no projeto de sistemas especialista. Em resposta aos estudos clássicos de IA em solucionar o problema de diagnóstico técnico pela propagação de causalidade no processo de para-trás e para-frente (“backward” e “forward”) através de uma árvore de conhecimento probabilística, um estudo baseado em lógica fuzzy é proposto no sentido de suprir as deficiências e desvantagens decorrentes da utilização de estudos de IA convencional. As fases principais da metodologia de diagnóstico são resumidas no seguinte. A princípio um modelo de diagnóstico interrelacional Fuzzy sintoma-falha é projetado separadamente (OFF-LINE) como uma base para o raciocínio diagnóstico. A informação diagnóstica obtida é primeiro organizada em redes causais diagnósticas. Estas, via procedimento “fuzzificação”, são transformadas em Redes Relevantes de Diagnóstico (RRD). Por compressão via composição Fuzzy a informação das RRDs, o modelo diagnóstico é obtido e codificado dentro de uma base de conhecimento como um conjunto de regras fuzzy IF-THEN. O mecanismo de inferência realiza o diagnóstico ON-LINE em duas

fases. Primeiro, e por raciocínio aproximado sobre o modelo de diagnóstico fuzzy com os valores observados do sintoma, o modelo é adaptado à situação de diagnóstico real. Então, por agregação suas informações concordam com as conectivas das RRDs, o modelo de diagnóstico adaptado e comprimido à um vetor contendo probabilidades de falha. Como candidato à falha os únicos com possibilidades máxima de falha são consideradas por validação via “generalized modus tollens”. Foi apresentado um exemplo simples para ilustrar a metodologia de diagnóstico proposta.

Outro estudo detalhado é apresentado em “From Boolean Probabilistic to Fuzzy Possibilistic Fault Tree Processing” [43] para considerações de inadequação de árvores da falha estáticas no caso de sistemas dinâmicos contínuos. Dentro de uma visão possibilística do tipo Zadeh, árvores de falha (termo inadequado e inapropriado utilizado nos estudos de IA e recomendado sua adoção somente como um suporte para agregação booleana de sintomas gerados estatisticamente) não são somente recuperadoras de informações determinísticas profundas alcançadas por especialistas mas também ganha um raciocínio diagnóstico de estrutura flexível, coincidindo sintomas identificados com a árvore comprimida, as distribuições de possibilidade local são extraídas e então agregadas sobre a árvore suporte dentro de uma visão de possibilidade de falha global. A técnica de processamento da árvore de falha possibilística proposta (a qual inclui os estudos possibilísticos como um caso particular de informação insuficiente) é apresentada em um exemplo tutorial. São investigadas a propagação de incerteza através da árvore possibilística bem como a falha identificada sob efeito de informações incompletas, imprecisas e inexatas.

Em “Diagnosis by Approximate Reasoning on Dynamic Fuzzy Fault Tree” [25], Ulieru sugere um modelo de raciocínio aproximado para sistemas dinâmicos de diagnósticos baseado na extensão Fuzzy, desenvolvida previamente nos estudos de síntese e análise de árvores de falhas. O conceito de Árvore de Falhas Fuzzy Dinâmica naturalmente surge do fato de casar árvore de falhas Fuzzy com sintomas dinâmicos. Apresenta-se um exemplo para mostrar o gerenciamento de falhas dinâmicas incipiente via processamento da informação Fuzzy.

Ainda, em 1992, Jorn Vatn [28], apresentou seu trabalho sobre “Finding minimal cut sets in a fault tree”, onde sugere um novo método para identificar os cortes mínimos em uma árvore de falhas. Os (não-mínimos) cortes são obtidos modificando-se o algoritmo já conhecido pelo nome de MOCUS. Estes cortes são armazenados em uma estrutura de árvore virtual que requer muito menos espaço do que a matriz de cortes MOCUS. Os cortes mínimos são obtidos transpassando esta árvore virtual um número razoável de vezes. No primeiro ciclo, todos os cortes mínimos de primeira ordem são identificados. No próximo ciclo, todos os cortes mínimos de segunda ordem são identificados e comparados com os cortes de primeira ordem para excluir os conjuntos não-mínimos. Este procedimento é estendido até que todos os cortes mínimos sejam identificados. Tal processo é muito eficiente. Comparado ao método padrão descrito no MOCUS, o tempo de computação fica bastante reduzido de no mínimo um fator de 10.

Neste mesmo ano de 1994, David P. Weber publicou seu trabalho [26] sobre “Fuzzy Fault Tree Analysis”. Segundo David a confiabilidade dos produtos é frequentemente uma preocupação inicial em segurança. Interpretação da confiabilidade tem de ser quantitativa e qualitativa. A análise quantitativa emprega a avaliação do risco probabilístico, e tem sido utilizada para fornecer danos previstos ou para minimizar efeitos de acidentes. A função de probabilidade **Weibull** é uma ferramenta vital nestas avaliações de riscos, mas são métodos qualitativos como em análises feitas com árvore de falhas. Os aspectos qualitativos da contribuição ao risco são subjetivos e contêm muitas incertezas. A análise de risco com todas as incertezas inerentes é um forte candidato à aplicação de lógica Fuzzy. A maioria das análises de risco não possuem um método adequado de expressar, propagar or interpretar a incerteza. Neste trabalho foi desenvolvido e apresentado um método em Lógica Fuzzy empregando a função de Weibull para representar as funções de pertinência para um conjunto de valores fuzzy (e intervalo fuzzy). Em “Fuzzy Weibull for Risk Analysis” [42], publicado no mesmo ano, o autor fornece maiores detalhes sobre este processo.

Outra proposta surge em 1994, com “New Gate Operations of Fuzzy Fault Tree Analysis” de Tomoyuki Fujino e et al [27]. Foi desenvolvido neste trabalho, a técnica

de fuzzificar os dois mais importantes portões utilizando as operações de “fuzzy mean” e “fuzzy sum”. “Fuzzy mean” é uma operação média entre AND e OR. Neste operador, os valores de entrada são pesados por efetividade e o cálculo baseado no método do algoritmo de DSW (Dong, Wong e Shah, 1988). A operação de Fuzzy Sum produz um efeito cumulativo sobre os dados de entrada. Este operador é baseado em medidas admissíveis (um caso especial de medida Archimedean). A função característica é determinada através de estudos de sensibilidade.

A natureza de ambas operações é qualitativa, a qual reflete o processo de pensamento humano. Daí, para futuros desenvolvimentos destas operações, serão necessários mais estudos orientados do ponto de vista linguístico.

Ainda em 1994, Olivier Coudert e Jean [29], com seu “MetaPrime: An Interactive Fault-Tree Analyzer”, afirmam que as eficiências de quase todas as ferramentas de análise disponíveis sobre árvore de falhas são limitadas pela efetividade de seus procedimentos computacionais dos modos de falhas. Todos estes procedimentos manipulam em extensão os modos de falhas da árvore de falhas, de tal forma que, os custos de análise estão diretamente relacionados ao número de modos de falhas que serão gerados, os quais na prática dificultam a utilização destas ferramentas sobre árvore de falhas, com mais de 20 000 modos de falhas.

Neste trabalho é apresentado um método de análise de árvores coerentes e não-coerentes revendo esta limitação devido ao seu custo computacional não estar relacionado ao número de eventos básicos, nem ao número de portões e nem ao número de modos de falhas. É apresentado o conceito do “MetaPrime” e os resultados experimentais obtidos em casos reais. Estes resultados mostram que os conceitos fornecem uma análise completa em segundos sobre árvore de falhas, como por exemplo com árvores com mais de E(20) modos de falhas.

Estes conceitos podem serem utilizados para analisar árvore de falhas, pois tal árvore, denota funções booleanas sobre as quais podem serem aplicados. A computação de todos os modos de falhas é crítica em outros domínios, em particular em aplicações de sistemas especialistas tais como manutenção de raciocínio e

diagnósticos de falhas múltiplas. Encontra-se em estudo a aplicação destes conceitos no “MetaPrime” para resolução destes problemas.

Em Margaret S. Elliott [30], a ênfase fica para Inteligência Artificial, Sistema Especialista, Análise de Árvore de Falha, Sistema Baseado em Conhecimento, Cortes Mínimos, Programação Orientada à Objeto e Análise de Confiabilidade. Aqui existe uma convergência cada vez maior destes assuntos citados anteriormente e discutido desta forma em alguns trabalhos apenas. O seu estudo, apresenta recomendações baseadas em conhecimento para analisar árvores de falhas de sistemas de engenharia. Este estudo pode ser utilizado para construir uma árvore de falha de um diagrama de bloco (utilizando redução para eventos repetidos), determinar cortes mínimos, e analisar o sistema para reprogramar alterações. É apresentado um exemplo com a implementação deste estudo em linguagem baseada em regras. Os resultados são comparados com outros sobre confiabilidade preparados manualmente sobre o sistema de potência elétrica e de um sistema hidráulico. O sistema baseado em conhecimento realiza o procedimento manual com rapidez e eficiência.

Surge agora uma nova proposta, no mínimo diferente, com Page e Perry [31] em “Standart Deviation As an Alternative”. Segundo eles, a construção de modelos de árvore de falhas envolve sempre julgamento ou estimativa de engenheiro especialista quando se trata de obter as probabilidades dos eventos primários. Um objetivo claramente desejável é o de caracterizar flutuações na probabilidade do evento topo que devem ser causadas pelas variações nas probabilidades dos eventos básicos. Diversos autores utilizam idéias emprestadas da teoria Fuzzy para implementar raciocínio fuzzy dentro dos algoritmos de árvore de falhas. Os eventos primário possuem probabilidades fuzzy, e o objetivo é de determinar a probabilidade do evento topo como um número fuzzy. A forma mais fácil de se introduzir incerteza em tais modelos é através das probabilidades dos eventos primários como variáveis randômicas cujo desvio padrão fornece uma medida de incerteza no modelo.

Neste trabalho a informação probabilística pode ser obtida pelo limite do desvio padrão da probabilidade do evento topo. Esta consideração fornece informação probabilística fora dos métodos fuzzy. Em contra partida, naturalmente, é preciso

conhecer o desvio padrão das probabilidades de ocorrência dos eventos básicos, e este conhecimento não exige considerações sobre metodologia fuzzy, na qual assume-se funções possibilísticas para os eventos primários. Mesmo se todas as distribuições de probabilidade dos eventos primários fossem conhecidas, dificuldades computacionais existem para determinar a distribuição de “probabilidade exata” do evento topo. Extensões de algoritmos existentes podem ser utilizadas para limitar o desvio padrão, com pouco acréscimo em complexidade computacional.

Passando para 1995, em “Fault Tree Analysis” [32], o propósito neste trabalho é apresentar um sistema especialista para análise de árvores de falhas. É uma aplicação para engenharia do conhecimento e uma metodologia para avaliação e medida de confiabilidade, disponibilidade, manutenção, e segurança de sistemas industriais utilizando a representação de árvores de falhas. A estrutura de orientação à objeto, regras de produção representando intuições especialista, algoritmos, e estruturas de base de dados são os elementos básicos do sistema. A arquitetura “blackboard” do sistema suporta avaliações qualitativa e quantitativas da árvore de falhas. As considerações de teoria fuzzy analisa problemas com poucos dados, muita “nebulosidade” ou imprecisão.

Em setembro de 1995, W. Hennings e Nickolaj [33], apresentaram o trabalho descrevendo que a principal dificuldade para árvores de falhas com grande número de eventos repetidos e “gates”, surge com a determinação de Cortes Mínimos. Os algoritmos de subida mais frequentes (“bottom-up”) são baseados na técnica de modularização usual com “truncamento” dos cortes mínimos de baixa probabilidade conduzindo a um grande tempo computacional com grandes limites superiores para a probabilidade de falha do sistema devido aos cortes mínimos truncados (erros de truncamento). Este trabalho apresenta um método novo para representação de níveis de árvore de falhas com eventos repetidos. O método encontra e simplifica os cortes mínimos ao nível dos portões, e daí passando para níveis mais inferiores de representação da árvore de falhas. Este método essencialmente reduz ambos, tempo e memória necessária para avaliar os cortes mínimos e conduz à um limite superior mais exato para o erro de truncamento. O código computacional FAMOCUTN usa o método

para avaliações rápidas de cortes mínimos (MCS) no caso de árvores grandes com portões repetidos e/ou negativos e o CUTQN para determinação da confiabilidade do sistema baseado nos MCS. Os códigos são descritos através de exemplos de sistemas reais do estudo de risco alemão para instalações nucleares de potência, Fase B e testado com duas árvores de falhas de um exercício recente padrão com código computacional para árvore de falha. Estes códigos estão atualmente sendo utilizados na Alemanha, em: 1) Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 85748 Garching, e 2) KFA - "Forschungszentrum Jülich GmbH", "Institute for Safety Research and Reactor Technology" (ISR-1), 52425 Jülich.

Outro trabalho deste ano de 1995, "Calculating Exact Top-Event Probabilities Using EII-Patrec" [34], trata de assuntos relacionados a determinação exata do evento topo. Avaliação de Risco Probabilístico (PRA) e teorema de Shannon. A preocupação está na aplicação de técnicas de avaliação do risco probabilístico para estudos de segurança em situações de guerra e causados por danos ecológicos. Neste domínio, as probabilidades dos eventos básicos podem ser grandes; exemplos típicos são os eventos caracterizando erros humanos e decorrente de fenômenos naturais. Os métodos de quantificação atuais em PRA ("Probabilistic Risk Analysis"), que são baseados em métodos aproximados podem nestas situações serem inadequados e conduzem a erros, superestimando resultados conservativos. Existem técnicas especiais para determinação exata da quantificação da probabilidade do evento topo, mas elas são limitadas a aplicações pequenas que não refletem os resultados realísticos de PRA. O método descrito neste trabalho combina o algoritmo de EII de Corynen e o esquema de Koen et al. de reconhecimento de padrões. O programa desenvolvido para computadores pessoais (PC) utilizando esta técnica é denominado de EII-Patrec e determina a probabilidade exata do evento topo de uma árvore de falha considerando os cortes mínimos. Existe o módulo EII de partições & disjunções de cortes mínimos e os sub-modelos resultantes são solucionados utilizando o recurso de repetir. O módulo de reconhecimento de padrão reduz a complexidade computacional identificando os sub-modelos repetidos no processo de cálculo, evitando a reavaliação do repetidos. o código EII-Patrec é desenvolvido para quantificar os modelos de árvores de falhas de

ambos sistemas coerentes e não-coerentes, e faz interface com um pacote gráfico, "SEATREE", para geração interativa da árvore de falhas. O dado de entrada do código EII-Patrec, é uma coleção de cortes na forma disjuntiva normal e não necessita ser mínimo. No caso antecipado, o método de avaliação do EII-Patrec da probabilidade exata do evento topo é uma forma polinomial como função do número de cortes; em situações piores pode ser até exponencial. Assim mesmo, este método resulta numa redução substancial em requisitos computacionais comparado ao método de inclusão-exclusão. Através de um exemplo exemplifica-se o algoritmo, apresentando os resultados decorrentes de sequencias de acidentes consideradas grandes.

1.4 - Organização da Tese.

Os capítulos de tese foram distribuídos em número de sete e os apêndices em dois. No final, foram apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

No capítulo 1, foram apresentados o contexto de tese, os objetivos, a revisão bibliográfica e a descrição de cada capítulo no item organização da tese.

No capítulo seguinte, são apresentados alguns conceitos básicos sobre lógica Fuzzy, incluindo operações com conjuntos fuzzy. Outro aspecto importante é a metodologia de como se deve proceder para objetivamente elaborar um projeto fuzzy: a descrição de variáveis de entrada e saída, a composição de regras e outros itens, até o processo final de "defuzzificação" de conjuntos necessários em um projeto que se vale de princípio de lógica fuzzy.

No capítulo 3, apresenta-se uma abordagem probabilística, comentando-se conceitos sobre esta técnica extensivamente empregada ao longo destes últimos anos, em diferentes instalações industriais para determinar a confiabilidade dos sistema de engenharia. Além de conceitos qualitativos, descreve-se o processo de avaliação das árvore de falhas e avaliam-se os códigos computacionais existente na literatura.

No capítulo 4, definem-se conceitos mais específicos que funcionam como base para abordagem do trabalho de tese. No item 4.1, encontra-se uma descrição da metodologia que precede àquela principal e empregada neste trabalho. Definição sobre índice de importância e outros que auxiliarão a compreensão das medidas de importância definidas no item 4.2.

No capítulo 5, foi descrito o processo de implementação em linguagem computacional, da complexa metodologia definida no capítulo anterior.

No capítulo 6, foram feitos alguns exemplos para verificar e validar (V&V) o aplicativo, procurando obter resultados comportados e esperados.

No capítulo 7, são discutidas as conclusões e os comentários finais sobre o método proposto e o aplicativo criado, e sugestões futuras de melhorias.

No apêndice A, existe a descrição sobre o excelente e fácil ambiente de programação DELPHI3.0, conceitos sobre estruturas de dados em Pascal e uma descrição sucinta sobre as interfaces do FuzzyFTA, mostrando como é fácil a utilização do aplicativo.

No apêndice B, foram apresentados os relatórios e a visualização de dados dos exemplos utilizados no capítulo 5, como recurso adicional implementado no FuzzyFTA.

2. LÓGICA FUZZY

2.1 - Visão Geral

A teoria Fuzzy foi idealizada por L. A. Zadeh em 1965, mas recentemente tem recebido grande atenção pelos pesquisadores de diferentes áreas.

Três condições são necessárias para o estabelecimento de um novo campo de estudo: primeiro, a necessidade da sociedade; segundo, uma nova metodologia (idéias e técnicas); terceiro, ser interessante aos pesquisadores [49].

A primeira é evidente na medida que se a vida de pessoas estão relacionadas a tecnologia dos computadores, é preciso se encontrar uma forma de que estes mesmos computadores possam entender a mente humana. Hoje, já se sabe da incapacidade da lógica tradicional representar o raciocínio humano e a lógica fuzzy apresentar formas mais apropriadas para isso. Como uma nova metodologia, em segundo lugar, é a que melhor representa a ambiguidade, incluindo também o conceito e a medida de probabilidade. E, em terceiro, como um sistema matemático, expande a perspectiva de pesquisas atuais tanto do ponto de vista prático quanto teórico. Os exemplos hoje do ponto de vista prático são muitos.

Uma forma mais ampla de verificar os campos de aplicação da lógica fuzzy é procurar dividir os problemas que podem ser abordados em três categorias tais como, Sistema Máquina, Sistema Humano e Sistemas Homem/Máquina.

O primeiro impasse que surge com o sistema Máquina é o de proporcionar um alto grau de inteligência à máquina. Hoje em dia, a inteligência é expressa em termos de proposições na engenharia do conhecimento, onde reconhecimento, julgamento, avaliação e inferência estão sendo imitadas. Por outro lado, a mente humana possui elementos ilógicos tais como intuição e inspiração, e isto é virtualmente impossível expressar através de um formalismo convencional. O conhecimento através do senso comum e o metaconhecimento para aquisição de informações são adotados para realizar esta tarefa. Se uma máquina consegue fazer tal proeza, já está próxima do conhecimento humano.

Em sistemas humanos, procura-se introduzir metodologia científica para tratar de problemas da sociedade. Hoje, existem razões fortes para se acreditar que se os problemas fossem modelados de uma forma ambígua, pesquisas neste campo estariam profundamente aceleradas.

Em Sistemas Homem/Máquina existe a presença de ambas situações na solução de problemas. Engenharia do conhecimento, CAD (“computer aided design”), e automação de escritórios são exemplos típicos. Nestes casos a comunicação entre o homem e a máquina é extremamente importante. O que tem acontecido nestes casos é que o homem tem se aproximado do nível da máquina, mas em sistemas de alto nível a máquina deve possuir no mínimo um nível satisfatório de entendimento de linguagem natural.

Em seguida apresenta-se uma lista de pesquisas realizadas ou de interesse utilizando a teoria fuzzy.

Sistema Máquina.

Reconhecimento de voz e imagem, reconhecimento de caracteres chineses, compreensão da linguagem natural, robôs inteligentes, reconhecimento de padrões, controle de processo, gerenciamento e produção, controle de trens e carro, sistemas de manutenção e de segurança, diagnóstico de desligamento, sistema de potência elétrico, controlador fuzzy, controle de sistemas elétricos residenciais, e operação automática.

Sistema Humano.

Modelo de confiabilidade humana, psicologia cognitiva, modelos de comportamento/pensamento, investigadores sensoriais, análise de ausência de conhecimento, avaliação de risco, avaliação ambiental, estruturas de relacionamento humano, modelos de tendência de demanda, análise de energia, modelos de seleção de mercado, análise de categoria, e psicologia social.

Sistema Homem/Máquina.

Diagnóstico médico, processamento de dados de inspeção, sistemas especialistas, CAI, CAD, planejamento de otimização, equipamento para diagnóstico, avaliação de qualidade, sistemas de garantia, interface humana, gerenciamento de sistema de decisão, sistemas de decisão de multipropósito, bases de conhecimento, e bases de dados.

De acordo com Toshiro Terano [49], quando fazemos uso da lógica fuzzy, devemos ter em mente e de forma bem clara o seguinte: (1) a parte do problema que devemos “fuzificar”, e qual o propósito, e (2) que tipo de modelo fuzzy deve ser usado neste caso. Para resolver isto, ele sugere dividir o pensamento sobre o assunto em duas categorias, conjunto de modelos e “nebulosidade”. No primeiro caso, por exemplo, o conjunto de elementos, o intervalo de sua definição, a expressão de relacionamento entre os conjuntos, o que as expressões significam, etc..., devem estar claras. Mesmo com lógica de predicados, se as primeiras definições e compreensões são ambíguas e expressas por sentenças insatisfatórias, existe uma boa chance de que os resultados não sejam bem compreendidos, devido a flexibilidade das sentenças. Já no segundo caso, devem ser tomados cuidados, mesmo quando os limites sejam vagos, enquanto que a estrutura lógica não é. Qualquer que seja a escolha de classificação, deve-se observar quanto aos objetivos estarem claros quanto ao que pretende o modelo e o seu objeto. As características são descritas à seguir:

1. Expressar experiência humana, pensamento comum, etc., numa forma que a máquina possa utilizar.
2. Fazer Modelos com sentimentos e linguagem humana.
3. Capacidade de imitar o reconhecimento de padrão humano, julgamento, ou compreensão geral.

4. Converter informação para uma forma que pessoas possam facilmente entender.
5. Condições de comprimir grandes volumes de informações.
6. Fazer Modelos de comportamento e de psicologia humana.
7. Fazer Modelos de sistemas sociais.

Uma vez que o objetivo ficou estabelecido, surge o problema de que parte do sistema e que forma de conversão para o conjunto fuzzy deverá ser feita. Existem muitas formas de modelar o sistema, mas no geral deve-se levar em conta o seguinte: variáveis de estado, variáveis independentes, variáveis de decisão, perturbação, leis de causa e efeito (transição), seus valores verdadeiros, objetivos, restrições, funções de avaliação, vários tipos de constantes. Mais adiante será descrito em detalhes a definição destas variáveis.

Estes são alguns itens que devem ser estudados meticulosamente, mas existem outros problemas, tais como a identificação da **função de pertinência** e a conversão de linguagem.

O CONCEITO DA TEORIA FUZZY.

O conceito está diretamente relacionado à ambiguidade de palavras e associada ao aspecto de incerteza. Como por exemplo o significado de termos como, temperatura alta, ou número pequeno são exemplos do que chamamos de situações com teor de nebulosidade.

A teoria Probabilística é em geral a ferramenta com que os matemáticos tem trabalhado para quantificar incertezas e normalmente associada a eventos randômicos relacionados à ocorrência de fenômenos, tais como, amanhã vai chover e outros.

A diferença entre as duas reside no fato de que são aspectos diferentes da incerteza. Repare nos exemplos o fator temporal nas incertezas probabilísticas, enquanto que nebulosidade trata da ambiguidade do significado de termos ou palavras e não precisa esperar que fatos ocorram, para que as incertezas fiquem mais claras.

O surgimento de uma teoria e outra, coloca a teoria Probabilística numa posição mais consolidada, considerando que ela data do século 17 e a Fuzzy existe apenas como teoria à 25 anos. Mas, nem por isso remove o conteúdo de incerteza expressada na teoria fuzzy. É importante lembrar, que todas as pessoas pensam e transmitem seus pensamentos e informações por meio de palavras.

Além das definições conceituais e significados de palavras, algumas concepções de nebulosidade suficientemente estendida incluem coisas como a incerteza de julgamento subjetivo de pessoas. O conhecido fator de subjetividade expressa o julgamento de ocorrências fenomenológicas únicas em termos de probabilidade. Esta ampliação da definição de nebulosidade inclui incertezas tipo probabilidade como um tipo de incerteza proveniente de julgamento.

Geralmente, a teoria fuzzy pode ser dividida em teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e teoria de medidas fuzzy. A primeira trata de nebulosidade de forma restrita, a de medidas fuzzy irrestrita e a lógica fuzzy usa os conjuntos fuzzy incorporados em uma estrutura de lógica multivalorada.

APLICAÇÕES ATUAIS E PARA O FUTURO.

De acordo com Kiyoji Asai, do “Osaka Institute of Technology” [49], a teoria de sistemas fuzzy está num ponto inicial de desenvolvimento de modelos de processos de julgamento e de pensamento ambíguos. e alguns campos de aplicação podem ser definidos:

1. Fazer modelos humanos que possam ser utilizados em problemas de gerenciamento e sociais.
2. Imitação de habilidades humanas de alto nível para o uso de automação e sistemas de informações.
3. Desenvolvimento de interfaces orientada à pessoas entre máquinas e o homem.

4. Outras aplicações de Inteligência Artificial e de Sociedade (análise de risco e predição, desenvolvimento de dispositivos funcionais).

A ORGANIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DA PESQUISA.

Existem dois comitês de pesquisa do IFSA (“International Fuzzy Systems Association”), “Intelligent and Fuzzy Systems in Business and Manufacturing e Fuzzy Mathematics”. Japão, Estados Unidos (USA), Europa e China possuem seus centros próprios para pesquisas. No Japão podem ser citados cinco grupos de pesquisas: “Fuzzy Reasoning and Expert Systems, Fuzzy Operations Research, Fuzzy Control”, com aplicações para engenharia civil e campos fora da engenharia que trabalham em cooperação com organismos internacionais. Normalmente, existem agendados, um simpósio anual e oito encontros anuais nas regiões de Kanto e Kansai.

2.2 - Os Fundamentos em teoria Fuzzy.

Nesta parte de definição dos fundamentos, será apresentado uma introdução aos temas pertinentes deste item e que diversos autores de uma forma ou de outra pouco diferem entre si, em suas exposições. Os conceitos serão complementados com mais riqueza de detalhes no próximo item, sobre projeto fuzzy.

Inicialmente, os elementos de uma teoria de conjunto fuzzy deve conter segundo R. Kruse [51], uma introdução elementar aos conjuntos fuzzy, formas simples de representar conjuntos fuzzy, Operações básicas sobre conjuntos fuzzy, o princípio de extensão, operações eficiente sobre conjuntos fuzzy, uma parte semântica, e a lógica fuzzy.

Em Toshino Terano [49], de forma mais objetiva, trata deste item abordando primeiramente, a quantificação de ambiguidade, e em seguida, conjuntos fuzzy, conjuntos precisos, operações com conjuntos fuzzy, α -Cuts e princípio de extensão, operações com números fuzzy e finalmente proposições fuzzy.

Basicamente, pelo que foi apresentado, os mesmos itens são e devem ser abordados nesta fase de fundamentos em teoria fuzzy. Optou-se aqui, utilizar os mesmos tópicos citados anteriormente, mas direcionado para aplicações em engenharia de segurança. Temas como (1) randomicidade e nebulosidade, (2) conjuntos fuzzy e operações com conjuntos fuzzy, onde são discutidos os fundamentos dos conjuntos fuzzy e suas operações, (3) relações fuzzy, apresentando as relações denominadas binárias, e relações de similaridade, (4) as variáveis linguísticas, abordando ainda os temas sobre (5) raciocínio aproximado e (6) extremização de funções fuzzy.

I. RANDOMICIDADE E NEBULOSIDADE.

Diversas situações práticas contém incertezas apresentadas em diferentes formas. Como já foi dito anteriormente, a incerteza nos dados e no sistema são normalmente tratados pela teoria estatística e probabilística. Somado a isto, um outro tipo de incerteza ocorre frequentemente, quando existe julgamento, avaliação, experiência e decisão humana. Este tipo de incerteza é diferente da anteriormente definida, em natureza. A primeira das incertezas é descrita em termos estocásticos, e a segunda a nebulosidade, utilizando a teoria do conjuntos fuzzy.

II. CONJUNTOS FUZZY E OPERAÇÕES SOBRE CONJUNTOS FUZZY.

II.1 - Conceitos Fundamentais e Operações sobre conjuntos fuzzy.

Em geral, um conjunto fuzzy é sempre definido em uma estrutura de algum conjunto ordinário, ou conjunto *crisp*, denominado de universo de discurso. A teoria dos conjuntos fuzzy trabalha com um subconjunto A do universo de discurso X , onde o grau de pertinência é descrito pela função de pertinência $\mu_a(x)$. Ele representa qualquer elemento x de X parcialmente pertencente à A , ou o grau de pertinência de x em A . A função pertinência adota valores no intervalo entre $[0, 1]$ ao invés do conjunto $\{0, 1\}$, como no caso de um conjunto ordinário ou conjunto *crisp*. Um elemento x pertence a A se $\mu_a(x) = 1$ e não pertence se $\mu_a(x) = 0$. Geralmente, o valor de pertinência é obtido do contexto do problema.

Os conjuntos ordinários são um caso especial de conjuntos fuzzy com valor de pertinência 0 ou 1. Por exemplo, assuma que

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$A = \{0.3/x_1, 0.7/x_2, 1/x_3, 0.5/x_4, 0.1/x_5\} \quad \text{Equação 2.2}$$

é um exemplo de um subconjunto fuzzy de X , onde os valores numéricos indicam os valores de pertinência de x . Utilizando esta interpretação pode se ver que x_2 , tem grau de pertinência de 0.7 no subconjunto fuzzy de A .

Simplificando a representação dos conjuntos fuzzy, é conveniente utilizar a seguinte notação:

se A é um conjunto finito fuzzy sobre X , então:

$$A = \mu_a(x_1)/x_1 + \dots + \mu_a(x_n)/x_n \quad \text{Equação 2.3}$$

$$= \sum \mu_a(x_i) / x_i \quad \text{Equação 2.4}$$

onde o sinal + significa a união.

se X não é finito, então

$$A = \int \mu_a(x)/x \quad \text{Equação 2.5}$$

II.2 - Operações sobre Conjuntos fuzzy.

Nesta parte as operações teóricas de conjuntos serão extendidas de teoria de conjuntos ordinários para teoria de conjuntos fuzzy. Os relacionamentos de subconjuntos fuzzy A e B de X com valores de pertinência $\mu_a(x)$ e $\mu_b(x)$ para $x \in X$, respectivamente, onde $\in$ é um elemento de, são apresentados à seguir (Yager 1986, Pal and Majumder 1986, Zimmerman 1985):

1. A é igual à B, $A = B$

$$\mu_a(x) = \mu_b(x) \quad \text{para todo } x \in X \quad \text{Equação 2.6}$$

2. A é um complemento de B, $A = \text{comp } B$

$$\mu_a(x) = 1 - \mu_b(x) \quad \text{para todo } x \in X \quad \text{Equação 2.7}$$

3. Conjunto fuzzy vazio é definido por

$$\mu_a(x) = 0 \quad \text{para todo } x \in X \quad \text{Equação 2.8}$$

4. A está contido em B, $A \subseteq B$

$$\mu_a(x) \leq \mu_b(x) \quad \text{para todo } x \in X \quad \text{Equação 2.9}$$

5. A união de A e B, $A \cup B$

$$\mu_{a \cup b}(x) = \max [\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad \text{Equação 2.10}$$

ou

$$\mu_{a \cup b}(x) = \mu_a(x) \vee \mu_b(x) \quad \text{Equação 2.11}$$

onde $\vee$ denota máximo.

6. A interseção de A e B, $A \cap B$

$$\mu_{a \cap b}(x) = \min [\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad \text{Equação 2.12}$$

ou

$$\mu_{a \cap b}(x) = \mu_a(x) \wedge \mu_b(x) \quad \text{Equação 2.13}$$

onde $\wedge$ denota mínimo. A próxima figura apresenta as funções de pertinência para

(a) $\mu_{a \cup b}$ e (b) $\mu_{a \cap b}$.

Equação 2.14

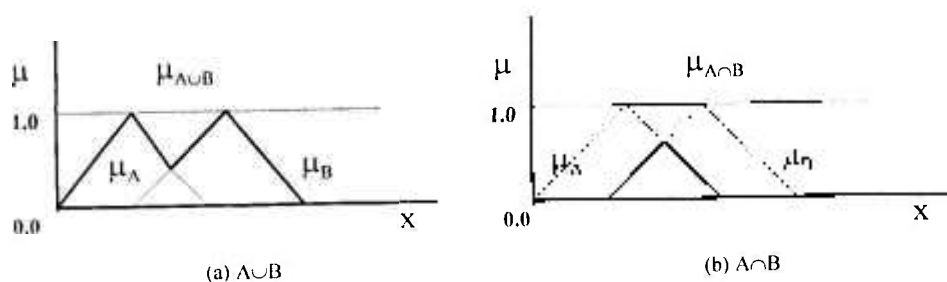


Figura 2.1 - Funções de pertinências para (a) $\mu_{A \cup B}$ e (b) $\mu_{A \cap B}$.

Algumas propriedades são úteis relacionadas à união e interseção de subconjuntos fuzzy e estão resumidas à seguir, nas quais A, B, e C representa subconjuntos fuzzy de X.

$$1. \text{Comutatividade: } A \cup B = B \cup A; A \cap B = B \cap A \quad \text{Equação 2.15}$$

$$2. \text{Idempotência: } A \cup A = A; A \cap A = A \quad \text{Equação 2.16}$$

$$3. \text{Associativa : } A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C = A \cup B \cup C \quad \text{Equação 2.17}$$

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C = A \cap B \cap C \quad \text{Equação 2.18}$$

$$4. \text{Distributividade: } A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \quad \text{Equação 2.19}$$

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \quad \text{Equação 2.20}$$

$$5. \text{Absorção: } A \cup (A \cap B) = A \quad \text{Equação 2.21}$$

$$A \cap (A \cup B) = A \quad \text{Equação 2.22}$$

$$6. \quad A \cap \phi = \phi \quad A \cup X = X \quad \text{Equação 2.23}$$

$$A \cup \phi = A \quad A \cap X = A \quad \text{Equação 2.24}$$

A única lei da teoria de conjuntos ordinários que não é válida aqui é (Pal and Majumder 1986)

$$A \cap \text{comp } A \neq \phi \quad A \cup \text{comp } A \neq X \quad \text{Equação 2.25}$$

III. RELAÇÕES FUZZY

III.1 - Relações fuzzy binária.

Aplicações de relações fuzzy são extensas e importantes. Sabemos que se X e Y são dois conjuntos ordinários, seu produto cartesiano é o conjunto $X.Y$ contendo todos os pares (x, y) onde $x \in X$ e $y \in Y$. Semelhantemente, um relacionamento fuzzy sobre o par X, Y é definido como um subconjunto fuzzy do produto cartesiano $X.Y$, respectivamente. Considere, agora, que A e B são dois subconjunto fuzzy de X e Y , respectivamente. O produto é um relacionamento fuzzy R sobre $X.Y$, no qual $R = A . B$ e daí,

$$\mu_R(x, y) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(y) \} \quad \text{Equação 2.26}$$

III.2 - Relações de similaridade.

Relações de Equivalência são conhecidas na teoria de conjuntos clássicos. O conceito de relação de similaridade é essencialmente uma generalização do conceito de uma relação de equivalência. As relações de similaridade as quais são importante são reflexivas, simétricas, e transitivas. Considere que uma relação de similaridade, S , seja uma relação fuzzy em X que é reflexiva, simétrica, e transitiva. Então S é uma relação de similaridade em X se e somente se, $\forall x, y, z \in X$, onde o símbolo $\forall$ significa para todo.

$$\mu_s(x, x) = 1 \quad (\text{reflexiva}) \quad \text{Equação 2.27}$$

$$\mu_s(x, y) = \mu_s(y, x) \quad (\text{simétrica}) \quad \text{Equação 2.28}$$

$$\mu_s(x, y) \geq \max y \{ \min \{ \mu_s(x, y), \mu_s(y, z) \} \} \quad (\text{transitiva}) \quad \text{Equação 2.29}$$

Como pode ser visto, a definição de transitividade é a expressão explícita de transitividade geral sobre a composição de máx-mín.

III.3 - Matrizes fuzzy.

As relações fuzzy podem ser representadas em forma de matrizes. As matrizes fuzzy são desenvolvidas utilizando a teoria de matrizes booleana e calculadas com as operações de lógica fuzzy.

Considere duas matrizes fuzzy $A = [a_{ij}]$ e $B = [b_{ij}]$, onde $0 \leq a_{ij} \leq 1$ e $0 \leq b_{ij} \leq 1$. Logo,

$$A \cup B = \max [a_{ij}, b_{ij}] = a_{ij} \vee b_{ij} \quad \text{Equação 2.30}$$

$$A \cap B = \min [a_{ij}, b_{ij}] = a_{ij} \wedge b_{ij} \quad \text{Equação 2.31}$$

$$A \circ B = \max [\min (a_{ij}, b_{ij})] \quad \text{Equação 2.32}$$

$$A \leq B \text{ existe sss } a_{ij} \leq b_{ij}, \forall i, j \quad \text{Equação 2.33}$$

$$\text{comp } A = [1 - a_{ij}] \text{ ou } \text{comp } B = [1 - b_{ij}] \quad \text{Equação 2.34}$$

onde $\circ$ é um sinal de multiplicação na composição de matrizes.

IV. VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS.

O conceito principal da teoria fuzzy é o da função de pertinência, que numericamente representa o grau no qual um elemento pertence a um determinado conjunto. Ele é acessado subjetivamente em qualquer instância. A questão está em como acessar esses graus de pertinência.

Em 1973, Zadeh, estabeleceu que os elementos contidos em um pensamento tipicamente humano, não são números e sim rótulos de conjuntos fuzzy. As pessoas são mais eficientes em avaliações qualitativas do que em análises quantitativas.

Provavelmente o uso de variáveis linguísticas e de lógica fuzzy são as formas nas quais o cérebro humano consegue para armazenar informações. A teoria de conjuntos fuzzy possibilita, conforme anteriormente citado, quantificar e manipular situações qualitativas, conceitos vagos, ou subjetividade de opiniões.

As variáveis linguísticas se comportam da mesma maneira que no caso de variáveis numéricas em um modelo matemático convencional, mas adotando palavras ou sentenças, no lugar dos valores destas variáveis. Os valores de variáveis linguísticas são então obtidas com o conjunto apropriado fuzzy.

A variável linguística difere da variável numérica pelo fato de se utilizar sentenças ou palavras em lugar de números. Considerando que palavras, em geral, são menos precisa do que números, o conceito da variável linguística serve ao propósito de fornecer uma maneira de caracterização aproximada do fenômeno para o qual a descrição em termos convencionais quantitativos, ficaria difícil. Mais especificamente, os conjuntos fuzzy que representam a restrição associada com os valores de uma variável linguística devem ser vistos como itens de várias subclasses de elementos em um universo de discurso. Isto, naturalmente, é análogo a situação imposta pelas palavras e sentenças numa linguagem natural. Por exemplo, o adjetivo elegante é um apenas um item, de características complexas da aparência de um indivíduo. Da mesma forma, pode ser visto como um rótulo para um conjunto fuzzy no qual representa uma restrição imposta por uma variável fuzzy chamada elegante. Destes ponto de vista, então, os termos muito elegante, não elegante, extremamente elegante, completamente elegante, e outros, são nomes de conjuntos fuzzy que resulta da manipulação sobre o conjunto fuzzy chamado de elegante com modificações do tipo muito, não, extremamente, completamente, etc. De fato, estes conjuntos fuzzy, juntamente com o conjunto fuzzy elegante, definem completamente a variável linguística elegante (Zadeh 1975).

V - RACIOCÍNIO APROXIMADO.

Zadeh (1973) propôs que o raciocínio aproximado refere-se ao processo pelo qual uma conclusão imprecisa é deduzida de uma coleção de premissas imprecisas, e tal raciocínio é qualitativo ao invés de quantitativo em essência. A declaração condicional fuzzy e regras composicionais de inferência fornece uma base para caracterizar os métodos do raciocínio aproximado.

Por exemplo, na declaração condicional fuzzy

premissa: A é verdadeiro.

Implicação: se A, então B.

Conclusão: B é verdadeiro.

Onde A e B são subconjuntos fuzzy dos conjuntos X e Y respectivamente, B na declaração condicional é idêntica à conclusão. Esta declaração descreve uma relação fuzzy R entre duas variáveis A e B. A função pertinência pode ser expressada como:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \vee [1 - \mu_A(x)] \quad \text{Equação 2.35}$$

Para regra de inferência composicional, em geral nos temos:

$$A_1: x \text{ é } R_1 \quad \text{Equação 2.36}$$

$$A_2: x \text{ e } y \text{ são } R_2 \quad \text{Equação 2.37}$$

então,

$$A_3; y \text{ é } R_1 \circ R_2$$

Equação 2.38

onde R_1 e R_2 são relações fuzzy, e $R_1 \circ R_2$ é sua composição.

VI - DETERMINAÇÃO DE VALORES EXTREMOS.

Os problemas gerais associados a valores extremos em engenharia tem sido tratado de forma que, somente uma função objetiva seja maximizada ou minimizada sob restrições de condições crisp. Mas muitas estruturas ou equipamentos práticos, planejamento ou projeto de tipos, dimensões, seleção de material, tecnologia de processo, etc., devem ter requisitos próprios competitivos e conflitantes. Eles satisfarão diversas necessidades decisórias. Estas necessidades devem também ter significado vago. Por exemplo, tão mínimo quanto possível, tão seguro quanto possível, tão confiável quanto possível, ou se possível significam condições fuzzy. Os objetivos e restrições crisp gerais são traduzidos em restrições fuzzy.

Tradicionalmente, um extremo (máximo e mínimo) de uma função objetiva de um modelo de decisão sobre um certo domínio está ligado à um ponto preciso, chamado a decisão ótima. Existe um relacionamento quase único entre o extremo de uma função objetiva e a noção da decisão ótima de um modelo de decisão. Entretanto, este relacionamento único não sobreviverá em modelos nos quais a nebulosidade esteja envolvida.

Considere que $f(x)$ seja uma função real em X , e que $\inf(f)$ e $\sup(f)$ sejam seus limites inferiores e superiores, respectivamente. O conjunto fuzzy $M = \{\mu_M(x) / x\}$, $x \in X$, com (Zadeh 1972).

é chamado de conjunto maximizado

$$\mu_M(x) = \frac{f(x) - \inf(f)}{\sup(f) - \inf(f)}$$

Equação 2.39

Considere que A seja um subconjunto fuzzy de X. A solução x^* , $x^* \in X$, satisfazendo a seguinte equação,

$$\mu_M(x^*) = \sup_{x \in X} [\mu_M(x) \wedge \mu_A(x)] \quad \text{Equação 2.40}$$

é referenciada como ponto máximo de $f(x)$ sobre A e $f(x^*)$ como valor máximo de $f(x)$ sobre A com restrições fuzzy.

2.3 - Projeto de um Sistema Fuzzy.

2.3.1 - Seleção das Variáveis de Entrada e Saída.

O ponto principal da técnica fuzzy é a idéia de variável linguística, aquela cujos valores são palavras e não números. Por exemplo, se duração.projeto é Longo então Risco.Térmico é grande. Neste caso, duração.projeto é a variável linguística, e Longo o valor da variável, ou conjunto fuzzy [50].

Existe um conceito importante em fuzzy, que modifica a forma dos conjuntos fuzzy da mesma forma que os advérbios e adjetivos na linguagem natural, que é o conceito de Qualificadores. Por exemplo, se duração.projeto é Muito Longo então Risco.Térmico é Extremamente Grande. Os qualificadores são muito e extremamente.

Um conceito mais geral aplicado as variáveis são os HEDGES. Podem ser classificados como: (1) Aproximações - em torno, aproximadamente, perto de; (2) Restrição de uma região fuzzy: abaixo de, acima de; (3) Intensificadores: muito, extremamente; (4) Diluidores: um pouco, levemente e (5) Contraste: (a) para

intensificar, tornando o conjunto menos fuzzy, positivamente e definitivamente e (b) para diluir, tornando o conjunto mais fuzzy, geralmente.

À representação de uma variável pode ser vista a seguir:

$$\text{VAR} \quad - \quad \{q_1, \dots, q_n\} \{h_1, \dots, h_n\} f_s$$

onde q_1, q_n qualificadores de frequência

h_1, h_n “hedges”

f_s conjuntos fuzzy

2.3.2 - Quantização do Universo de Discurso das Variáveis de Entrada e Saída.

É o espaço fuzzy completo da variação de uma variável do modelo, ou seja seu domínio. Existe dentro deste processo de quantização duas definições importantes: o (a) Support Set e o (b) Conjunto α -cut. O Support Set, é a área efetiva do domínio de um conjunto fuzzy que apresenta valores de $\mu(x) \neq 0$. É importante para interpretação e gerenciamento de regiões fuzzy dinâmicas. O conjunto α -cut, é uma restrição limite imposta ao domínio, baseada no valor de $\mu(x)$ acima de um certo valor de α .

2.3.3 - Composição de Regras de Inferência

Basicamente, precisa formar o conhecimento e efetuar o raciocínio. Para tal, existem proposições a serem definidas, que são declarações que relacionam as variáveis do modelo com os conjuntos fuzzy. A proposição é formada por um antecedente e um conseqüente., isto é, composição de uma ou mais cláusulas conectadas pelos operadores AND e OR. Uma série de proposições devem ser

definidas e avaliadas para determinar o grau de verdade do conjunto (composição). Todas com grau $\neq 0$ contribuem para o estado final de saída.

Existem dois tipos de proposições: (1) Condicionais, onde o consequente está relacionado com o grau de verdade do antecedente e (2) Incondicionais, onde, neste caso, a posição de um elemento dentro de um consequente, é determinada pela composição dos valores verdade de todo o antecedente.

Covem lembrar que, a ordem de execução das proposições é importante. Para modelos com somente proposições condicionais ou somente com proposições incondicionais, a ordem é irrelevante. Se o modelo contém ambos, a ordem é importante, dependendo se a proposição incondicional é aplicada antes ou depois da condicional.

Proposições Incondicionais são geralmente usadas como “default”, isto é, se nenhuma regra condicional é executada, o valor da solução é determinado pela incondicional. Se nenhuma regra condicional possui um antecedente maior que a regra incondicional, as condicionais não contribuirão para a solução, consequentemente, devem ser executadas antes.

2.3.4 - Definição das Funções de Pertinência

Interpretada como a medida de compatibilidade entre um valor do domínio e o conceito do fuzzy set. O conjunto fuzzy quando representado graficamente possui (1) o eixo x (números reais crescentes) que constituem a população do conjunto fuzzy; (2) o eixo y, definido entre 0 e 1, mede o grau de pertinência ao conjunto e (3) a superfície do conjunto fuzzy que conecta um elemento do domínio com o grau de pertinência ao conjunto.

As funções de pertinências são representadas graficamente através da forma (1) LINEAR, crescente e decrescente, sendo o conjunto mais simples e uma boa escolha na aproximação de conceitos não bem compreendidos; (2) SIGMOID LOGÍSTICA, importante na modelagem da dinâmica da população onde a amostragem

dos valores individuais aproxima a uma variável aleatória contínua (ex.: tempo de espera na fila de um guiche de banco), também muito utilizada para representar qualificadores de frequência; (3) SINOS; (4) TRIANGULAR e TRAPEZOIDAL, sendo mais simples de especificar e representações (5) IRREGULARES, onde ocasionalmente as formas padrões vistas não conseguem capturar a semântica de uma variável.

2.3.5 - Discretização do Universo de Entrada e Saída

O último estágio para definição dos cálculos do projeto fuzzy, fica para discretização. Primeiro seleciona-se as variáveis linguísticas, em seguida a quantificação do universo de discurso, depois fazer a composição das regras e definir as funções de pertinência. Feito isto, passa-se ao processo de discretização.

2.3.6 - Seleção do Tipo de Implicação (Min. / Máx.)

Para selecionar o tipo de implicação, precisa-se das regras composicionais fuzzy que é uma forma de compor às várias proposições, agregando e correlacionando os espaços fuzzy. O que ocorre, é que, todas as proposições são executadas em paralelo para criar um espaço de saída contendo informações de todas as proposições. Cada proposição condicional com valor verdade maior que o limite α -cut contribui para a forma final da variável de saída. Existem dois métodos principais: (a) MIN-MAX e (b) FUZZY-ADITIVE.

No primeiro caso, MIN-MÁX, a região consequente é restrita ao mínimo do valor verdade do predicado. E daí, a atualização da região fuzzy de saída é feita considerando-se o Máximo dos conjuntos minimizados.

Na FUZZY-ADITIVE, a região fuzzy consequente também é reduzida ao mínimo da verdade do predicado. E daí, ao invés de utilizar o máximo para atualizar a

região de saída, se usa a soma limitada, que é, a soma dos graus de pertinência com limite máximo igual à 1. Este caso se aplica em situações onde se deseja que todas as regras contribuam de alguma forma para a solução final. O exemplo típico vai para a Análise de Risco.

O Raciocínio Monotônico é uma técnica de implicação mais simples. É utilizada quando o sistema de raciocínio gera um valor esperado sem passar por composição e decomposição, isto é, o valor de saída é estimado diretamente do grau de pertinência do antecedente. Um exemplo típico, é aquele para estimar peso de uma pessoa. Considere dois conjuntos nebulosos, ALTO e BAIXO. A regra neste caso, é SE ALTURA é ALTA então PESO é PESADO. A saída é uma única variável fuzzy, controlada por uma única regra. Pode-se ainda, utilizar o predicado de forma mais complexa, com vários operadores.

2.3.7 - Seleção do Método de Correlação (Mínimo / Produto)

Ambos os métodos citados anteriormente, MIN-MAX e ADDITIVE, reduzem o valor verdade da região consequente através do mínimo dos valores verdade dos predicados. A partir deste valor mínimo, existem 2 métodos para restringir o conjunto de saída: (1) "CORRELATION MINIMUM" e (2) "CORRELATION PRODUCT". No primeiro, forma-se um "plateau" na forma gráfica de saída com perda de informação, mas com maior simplicidade e facilidade para "desfuzzificação". No segundo caso, deve-se multiplicar o conjunto pelo valor mínimo do predicado.

2.3.8 - Seleção do Método de Defuzzificação (Centróide / Altura Máxima)

Após a avaliação das proposições tem-se o conjunto fuzzy associado a cada variável da solução. Para se determinar o valor real de saída, deve-se passar pelo processo de defuzzificação. É o processo final do Raciocínio fuzzy. Existem vários métodos baseados em Heurística e os mais usados são: CENTRÓIDE (“composite momentum”) e ALTURA MÁXIMA (“composite maximum”). No primeiro caso, deve-se encontrar o ponto de equilíbrio da região fuzzy calculando a média ponderada das regiões fuzzy. Este é o mais empregado, por ser mais fácil de se calcular e de ser suave nas mudanças. No segundo caso, deve-se achar o ponto do domínio com grau de pertinência máximo. Se existir “plateau”, determina-se a média do plateau. Os problemas neste caso, são (a) a sensibilidade à uma regra dominante e (b) tender a pular de uma regra para outra. A aplicação deste segundo caso tem maior interesse em avaliação de risco, pois são situações em que se deseja avaliar o máximo de uma certa propriedade.

Seguindo estes passos, não rigorosamente nesta ordem, o projeto fuzzy estará bem definido e calculado.

2.4 - Aritmética Fuzzy, Modelos Probabilísticos x Possibilísticos, Números Híbridos

Alguns itens são de grande relevância nesta etapa de fundamentos e conceitos sobre a teoria fuzzy e podem ser identificados como: (i) Aritmética Fuzzy, (ii) Modelos Probabilísticos e Possibilísticos, e (iii) Números Híbridos.

Quanto a aritmética fuzzy, as principais operações estão descritas no capítulo 4, e são constituídas de soma, subtração e multiplicação entre conjuntos de números fuzzy.

MODELOS PROBABILÍSTICOS & POSSIBILÍSTICOS.

A representação gráfica para conjuntos de números fuzzy, utilizando um tipo de distribuição, pode de certa forma se assemelhar a representação gráfica da distribuição de probabilidade convencional, definida sobre o mesmo conjunto ou domínio. A utilização de uma unidade de intervalo nos dois casos e o fato de ambos os conceitos descreverem incertezas força ainda mais esta analogia. Entretanto, esta aparente analogia é realmente superficial, possuindo diferenças essenciais [63].

Na representação probabilística de incerteza, a adição é a hipótese básica. Entretanto, a adição não é adequada em situações onde exista ausência de conhecimento. A definição de uma medida de possibilidade é similar a medida de probabilidade, com a diferença de que a possibilidade de uma soma é o supremo das possibilidades individuais.

Existe uma certa similaridade formal entre uma função de pertinência fuzzy e a função densidade de uma variável randômica. Entretanto, a função densidade é normalizada para uma área sob a função, muito embora o número fuzzy esteja em contraste normalizado pelo seu valor máximo. Sobretudo, as funções densidade de probabilidade podem ser bimodal o que não é permitido para números fuzzy pela hipótese de convexidade. A mais importante diferença consiste nas operações: a função densidade da soma de duas variáveis randômicas é calculada com algum tipo de integral de convolução (determinada pela dependência entre as variáveis randômicas). Enquanto que, a soma de dois números fuzzy é calculado com o princípio de extensão que não envolve operação de soma-produto.

Na prática, os dois tipos de incertezas devem ocorrer simultaneamente conduzindo ao conceito de probabilidade fuzzy. Uma combinação dos conceitos é possível e algumas vezes necessária. Zadeh (1973), em seu princípio de consistência, estabeleceu que, sobre qualquer intervalo, a possibilidade de um evento fuzzy, relacionado a uma função de pertinência, será maior do que sua probabilidade sobre qualquer intervalo de X . Uma bibliografia completa da passagem de probabilístico para possibilístico, junto com a técnica, pode ser encontrado em Dubois e Prade (1993).

NÚMEROS HÍBRIDOS

No processamento híbrido de dados de incerteza estocásticos e subjetivos, ocorrerá uma profunda modificação com relação as operações com números fuzzy. Normalmente, a análise de incertezas reconhece separadamente, fontes de incertezas estocásticas e subjetivas de incertezas, mas sistematicamente não combina as duas, muito embora uma quantidade grande de dados utilizados na análise sejam particularmente estocásticos e subjetivos. Algumas metodologias já foram desenvolvidas, para combinar matematicamente dados de incertezas estocásticos e subjetivos, baseadas em uma nova abordagem de números híbridos. A metodologia pode ser utilizada em conjunto com várias técnicas tradicionais, tais como avaliação probabilística de segurança e suporte à decisão em análise de risco. Os números híbridos tem sido considerados como um método potencial para representar combinações de informações estocásticas e subjetivas, mas as operações matemáticas tradicionais são consideradas um impedimento aos requisitos inerentes na estrutura dos números, como por exemplo, não existe uma maneira conhecida de se multiplicar números híbridos.

No trabalho de J. Arlin Cooper e outros [56], novos métodos foram propostos envolvendo cálculos com números híbridos procurando superar esta dificuldade. Foi sugerido que, um número híbrido seja tratado como uma distribuição de probabilidade que é conhecida somente fuzzificada, ou de forma alternativa como uma distribuição de números fuzzy, e foram então demonstrados métodos para uma completa adaptação de operações matemáticas, permitindo cálculos complexos. Neste trabalho citado, foi descrito como a informação subjetiva (a taxa de subjetividade em relação a estocástica conhecida em torno de um dado particular) pode ser incorporada.

Ainda, neste trabalho citado, as duas formas de incertezas são tratadas separadamente, ou seja, em pares (f, p) , onde f é um número fuzzy e p é tratado como

uma uma distribuição de probabilidade [Kaufmann e Gupta, 1985]. Esses pares conhecidos como números híbridos, podem ser adicionados envolvendo os respectivos elementos de acordo com a regra normal para aritmética fuzzy e a teoria da probabilidade. Kaufmann em 1986, se aprofundou e explorou em mais detalhes essa estrutura algébrica de números híbridos. A formulação desenvolvida por Kaufmann/Gupta permite adição e subtração, ou seja:

$$(f_1, p_1) + (f_2, p_2) = (f_1+f_2, p_1+p_2), \quad \text{Equação 2.41}$$

onde o sinal de mais (+) no lado direito da expressão indica, respectivamente, a operação de convolução de max-mín fuzzy seguida da operação de soma-produto probabilística ordinária. Esta formulação, não permite diretamente a multiplicação ou a aritmética híbrida total (ou seja, o produto de um número completamente fuzzy e um número completamente probabilístico é indefinido).

No trabalho de Cooper, outras formulações foram sugeridas para permitir multiplicação, divisão e outras operações, de forma a serem utilizados em problemas envolvendo análise de risco, onde coexistam a variabilidade e a subjetividade. Os números híbridos podem ser tratados de duas formas: uma distribuição de probabilidade fuzzy, ou uma distribuição randômica de números fuzzy. Estes dois conceitos são equivalentes, mas possuem interpretações complementares e estratégias de cálculos diferentes.

Os conceitos apresentados neste capítulo, formam uma base para a metodologia abordada e adotada neste trabalho de tese e para futuras recomendações discutidas no capítulo 7, de conclusões finais.

3. ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS

As considerações de análise de um sistema são divididas em dois tipos: métodos indutivos e dedutivos. Os métodos indutivos partem de situações específicas e generalizam, enquanto que os métodos dedutivos especializa casos gerais. Como exemplo do primeiro tipo são: (1) Análise de Danos Preliminares (“Preliminary Hazards Analysis” - PHA), (2) Modo de Falha e Análise de Efeitos (“Failure Mode and Effect Analysis” - FMEA), (3) Efeito do Modo de Falha e Análise de Criticalidade (“Failure Mode Effect and criticality Analysis” - FMECA), (4) Análise de Danos de Falhas (Fault Hazard Analysis - FHA), e (5) Matriz Falhada Dupla (“Double Failure Matrix” - DFM). No segundo caso, dedutivo, um exemplo típico é o de Análise de Árvore de Falhas (“Faut Tree Analysis” -FTA), objetivo deste capítulo.

Os conceitos relativos aos exemplos de métodos indutivos estão descritos na literatura [38,40] e não serão discutidos aqui. É muito importante para este trabalho de tese e para o leitor interessado, o conhecimento sobre Fundamentos de Probabilidade e Estatística, Fundamentos de Engenharia de Confiabilidade, Fundamentos de Sistemas de Engenharia, e Dados de Falha. O objetivo deste capítulo é de se familiarizar com certos termos da área criando uma motivação inicial. Estes conceitos estão muito bem apresentados em Sundararajan [52], e de maneira objetiva fornece um completo suporte ao uso da metodologia de Árvore de Falhas.

Em seguida serão apresentados itens, tais como: conceitos básicos, elementos básicos, fundamentos para construção de árvores de falhas, técnicas de avaliação, e códigos computacionais.

3.1 - Conceitos Básicos de Análise de Árvore de Falhas

Existem nos estudos de FTA, dois pontos de vista que normalmente são considerados, caracterizando o modelo de Sucesso x Falha, e são: tratar a operação do sistema com várias forma de sucesso, definindo o Espaço de Sucesso, ou várias formas para falha do sistema, definindo o Espaço de Falha. O intervalo entre o sucesso total e completa falha, pode ser dividido em três pontos denominados de: Mínimo Sucesso Aceitável, Mínimo Sucesso Antecipado e Máximo Sucesso Antecipado, para o espaço de sucesso e de Máxima Falha Tolerável, Máxima Falha Antecipada e Mínima Falha Antecipada, para o espaço de falha. Estes pontos coincidem nesta ordem, ou seja, mínimo sucesso com máxima falha e assim em diante. Existem diversas vantagens de se tratar a operação dos sistemas desta forma, conforme descrito em [38].

O evento indesejado de uma árvore de falha, denominado de evento topo, é feito pela análise da árvore na qual métodos são desenvolvidos para determinar as causas deste evento topo.

3.2 - Os Elementos Básicos de uma Árvore de Falhas

O modelo da árvore de falhas, pode ser descrito simplesmente através de uma técnica analítica, onde estão combinados estados indesejados de sistemas, normalmente associado à segurança, e ambiente e operação dos mesmos, para determinar o evento indesejado que pode ocorrer. Falhas sequenciais e paralelas são combinadas em uma representação gráfica de forma a caracterizar o evento indesejado pré-definido. Estas falhas podem ser de todos os tipos, tais como, àquelas decorrentes de falhas físicas de componentes, falhas do tipo humanas e outras externas ao sistema que possam conduzir a eventos indesejados. Estas falhas denominadas de eventos básicos ou terminais, quando combinados de forma lógica conduzem a ocorrência e determinação do evento topo de uma árvore de falha. Este tipo de representação cobre apenas falhas que um determinado especialista consegue identificar, não cobrindo de forma alguma

todas as falhas possíveis do sistema ou todas as causas possíveis de falha do sistema. Outro aspecto importante, é o fato da árvore de falha constituir apenas uma técnica qualitativa e que pode ser avaliada quantitativamente.

A representação gráfica da árvore é constituída de portões (“gates”) lógicos, cuja finalidade é de relacionar os eventos básicos e combinados algumas vezes com outros portões, levando para níveis superiores na árvore, as informações destas combinações de falhas. A saída destes portões, é passada para camadas superiores da árvore, isto numa representação do tipo “bottom-up”. Os eventos básicos constituem os dados de entrada destes portões.

Uma típica árvore possui símbolos, descritos amplamente na literatura [38, 52, 53, 54], e são empregados como blocos construtores das mesmas. Vale destacar o evento básico, e como o próprio nome ajuda, não necessita de mais desenvolvimento, é representado por uma circunferência. Os símbolos de portões, os mais importantes, denominados de **AND** e **OR**, o primeiro é utilizado para mostrar que a falha de saída ocorre somente se todas as falhas de entrada acontecem, e no segundo o evento de saída se e somente se um ou mais de um dos eventos de entrada ocorre.

Como complementação, outros símbolos para construção da árvore, estão associados à: (1) EVENTOS PRIMÁRIOS: básicos, condicionantes, não-desenvolvidos, e externos; (2) EVENTOS INTERMEDIÁRIOS: intermediários; (3) PORTÕES: and, or, or-exclusivo, and-prioritário, e inibidor; TRANSFERÊNCIA: in, e out.

3.3 - Os Fundamentos para Construção de Árvore de Falhas

FALHA (“fault”) & FALHADO (“failure”).

Existe uma grande diferença entre estes dois conceitos. Podemos dizer, como exemplo, que quando um componente não funciona dentro de especificações de projeto ele é dito falhado, e quando fora das especificações de projeto dito como falho. Dito de

outra forma, todo tipo de componente falhado é sempre um componente falho, mas nem todo componente falho está falhado.

A definição de um componente falho exige a especificação de ambos, ou seja, o tipo de estado indesejável e o instante de tempo que ocorreu .

OCORRÊNCIA DE FALHAS & EXISTÊNCIA DE FALHAS.

Esta diferença é importante para quantificação da árvore de falha. Um componente deve ser reparável. Em sistemas não reparáveis, uma falha ocorrendo continuará a existir. Para componentes reparáveis deve existir a diferença entre ocorrência e existência de falhas. Do ponto de vista de construção de árvores, somente fenômenos de ocorrência de falhas serão importantes.

COMPONENTES ATIVOS & PASSIVOS.

Na maioria dos casos é importante considerar os componentes em dois tipos: passivos e ativos. Um componente passivo contribui de forma quase que estática para o funcionamento do sistema. Exemplos típicos são: tubulações, anéis, e outros. Um componente ativo contribui de forma mais dinâmica para seus sistemas aos quais estão ligados modificando seu funcionamento. Exemplos típicos são: relés, resistores, bombas, e outros. Um componente passivo é um transmissor de sinal, e um componente ativo é um gerador e modificador deste sinal.

Esta diferença é importante do ponto de vista de confiabilidade numérica, pois existem valores significativos de diferença entre suas taxas de falhas, cerca de 2 a 3 ordens de grandeza.

CATEGORIAS DE FALHA DE COMPONENTES.

É importante fazer distinção entre os tipos de falha de componentes. Existem três tipos: Primárias, Secundárias, e de Comando. As primárias, os componentes falham com valores inferiores aos quais foram projetados, ou seja, abaixo das especificações de projeto. As secundárias falham em qualquer valor fora das especificações de projeto. Estas duas como são falhas de componentes estão sempre associadas à primárias e secundárias. Já um comando falho, envolve a operação errada de um componente no tempo ou no espaço.

MECANISMO, MODO, EFEITO DA FALHA.

É oportuna e também muito relativa a definição de Sistema, Sub-Sistema, e Comandos. Naturalmente, esta diferença na classificação é de total interesse do especialista ao modelar o problema utilizando a técnica de árvore de falhas. Teoricamente, existem sistemas constituídos de sub-sistemas que são feitos de componentes. Na prática, esta definição é baseada em uma conveniência de forma a proporcionar uma hierarquia e limites para o problema.

Durante a construção da árvore de falha essa separação, efeito, modo e mecanismo, é importante para determinar o relacionamento mútuo entre os eventos. Quando consideramos o efeito é porque estamos preocupados no por quê de determinada falha ser de interesse, ou seja quais são seus efeitos, se existirem, sobre o sistema. Quando o modo de falha é considerado, estamos pensando nos aspectos de falha do componente que são relevantes. Quanto ao mecanismo, estaremos considerando como um modo de falha particular pode ocorrer e também, quais são as probabilidades correspondentes.

CAUSA IMEDIATA.

Considerando um sistema para análise, primeiro o analista define o próprio sistema (isto é, determina seus limites) e então seleciona um modo de falha particular do sistema para futuras análises. Esta última fase constitui o evento topo da árvore de falhas do sistema. O próximo passo é determinar as causas imediatas, necessárias, e suficientes para a ocorrência deste evento topo. É importante lembrar que, estas não são as causas básicas e sim as causas imediatas ou os mecanismos imediatos para o evento.

REGRAS BÁSICAS PARA CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS.

A construção da árvore de falhas pode ser descrita através de um conjunto de regras [38].

Regra 1: Escrever as declarações que são colocadas em caixas eventos como falhas: estabelecer precisamente que falha é, e quando ocorre.

O próximo passo no procedimento é examinar cada declaração na caixa e perguntar a questão: Pode esta falha consistir de um componente falhado? Esta questão e sua resposta conduz a regra 2.

Regra 2: Se a resposta para a questão, Pode esta falha consistir de um componente falhado? é positiva, classificar o evento como um estado-de-componente falho. Se a resposta é negativa, classificar o evento como um estado-do sistema falho.

Em contribuição as estas duas regras básicas, existem um numero de declarações procedimentais que foram desenvolvidas. A primeira destas é Nenhuma Regra Milagrosa:

Nenhuma Regra Milagrosa: Se o funcionamento normal de um componente propaga uma sequência falhada, então considera-se as funções do componente normal.

Duas declarações de procedimentos da atenção ao fato de não ser metódico e tentar reduzir o processo de análise. A primeira é a regra do “complete-the-gate”:

Regra “complete-the-gate”: Todas as entradas de dados para um portão particular serão completamente definidas.

A segunda regra é:

Regra “No gate-to-gate”: portões de entrada serão definidos eventos falhos, e portões não estarão diretamente relacionados a outros portões.

Uma construção real de árvore de falha é uma arte e uma ciência e depende muito da experiência pessoal. A construção da árvore de falha segundo MacCormick [53], vem acompanhada de um conjunto de regras e difere muito pouco da anteriormente apresentada.

3.4 - Avaliação da Árvore de Falhas

Na prática, todos os eventos básicos são estatisticamente independentes, exceto quando eles são de falhas de causa comum. Estas falhas são as provocadas por uma causa comum ou evento iniciador, no caso de, dois ou mais eventos primários não serem independentes.

Definida a estrutura, a análise posterior é dedutiva e dividida em duas partes: **qualitativa e quantitativa**. Na análise qualitativa o objetivo é reduzir a árvore à uma forma equivalente lógica em termos de combinações específicas dos eventos básicos suficientes para causar a ocorrência do evento topo indesejado. Esta combinação será um **corte mínimo** de modos de falha da árvore. Um corte mínimo é um conjunto de eventos que não pode ser reduzido em número, cuja ocorrências conduzam ao evento topo. Existem várias metodologias de cálculo e destas as duas mais conhecidas de redução de árvore são: álgebra booleana e solução numérica.

A análise qualitativa consiste em determinar numericamente a probabilidade do evento topo por transformação da estrutura lógica em uma forma equivalente de

probabilidade. A probabilidade do evento básico é a probabilidade de falha do componente ou sub-sistema durante seu tempo de operação. Esta probabilidade pode ser constante com o tempo ou não.

Em seguida é apresentada a probabilidade para os dois tipos de portões AND e OR:

$$P(A_1 A_2 \dots N_a) = P(A_1) P(A_2) \dots P(N_a) \quad \text{AND} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$P(A_1 + A_2 + \dots + N_a) \cong \sum P(N_a) \quad \text{OR} \quad \text{Equação 3.2}$$

Uma vez construída, ela é descrita por meio de um conjunto de equações booleanas, uma para cada portão da árvore. As variáveis de entrada de cada portão são independentes, e o evento de saída é a variável independente. Utilizando as regras de álgebra booleana [38, 40], determina-se os eventos intermediários e o evento topo, expressos em termos de cortes mínimos que utilizam somente eventos básicos.

A importância de um corte mínimo para o evento topo é verificada em duas regras básicas: (1) a importância de cada corte mínimo é inversamente proporcional ao número de eventos básicos do caminho. Isto é, se cada evento básico na árvore de falhas possuir uma probabilidade de 10^{-5} de ocorrer, então os cortes de um evento teriam uma probabilidade de 10^{-5} de ocorrer, os cortes de dois eventos teriam uma probabilidade de 10^{-10} de ocorrer, e assim por diante e (2) qualquer corte mínimo com um evento deve ser evitado se possível redefinindo o sistema, especialmente se o componente é um componente dinâmico, tal como uma válvula, ao invés de um componente estático, tal como uma tubulação ou trocador de calor.

Isto é devido a diferença entre as taxas de falha de cada tipo de componente, que no caso do componente dinâmico, possuir até uma ordem de grandeza ou mais, superior ao componente estático.

Em resumo, a análise qualitativa da árvore de falha é uma redução booleana [53], e seu procedimento é resumido à seguir:

1. Codificar os portões e eventos primários.
2. Listar os tipos de portões e entrada de dados.
3. Escrever as equações booleanas dos portões.
4. Utilizar álgebra booleana para determinar o Evento Topo em função dos cortes mínimos.
5. Eliminar as redundâncias nos cortes, utilizando álgebra booleana, para determinar os cortes mínimos.

De forma bem objetiva a análise não deve deixar de lado (i) a determinação dos cortes mínimos, (ii) determinar os caminhos mínimos, e (iii) o “ranqueamento” dos eventos básicos de acordo com suas importâncias [52]. Evidentemente a técnica mais importante é a dos cortes mínimos, mas o de caminho mínimo, baseado nos complementos de eventos básicos e complementos de portões para determinação de caminhos possíveis que não conduzirão ao evento topo, pode também ser útil na análise quantitativa da FTA. O ranqueamento quantitativo é mais confiável e mais preciso com relação as informações de importância dos eventos básicos, mas a qualitativa se torna relevante na fase inicial de definição de um projeto antes dos dados quantitativos estarem disponíveis sobre as probabilidades dos eventos básicos, também conhecidos como eventos terminais.

A análise quantitativa pode ser realizada antes da análise qualitativa e sem o uso de cortes mínimos e dos caminhos mínimos. Existem métodos para isso [52]. Mas, com certeza informações muito importantes serão deixadas de lado.

A análise qualitativa da árvore de falha é dirigida ao cálculo da probabilidade de ocorrência do evento topo, dada uma árvore de falha e a probabilidade de seus eventos básicos. Existem duas considerações possíveis que devem ser seguidas, que dependem do tamanho da árvore e da informação desejada. Se os cortes mínimos são conhecidos, então a probabilidade do evento topo é a probabilidade da união dos corte mínimos, e é expressa em termos das probabilidades dos eventos básicos.

Outra abordagem interessante [52], diz respeito ao propósito para o qual a árvore esteja sendo utilizada, ou seja: (i) se o evento topo é um evento indesejado em qualquer instante de tempo, como no caso de um acidente, a nossa preocupação é com a confiabilidade, e (ii) se a análise é verificar se um dado sistema está falhado (desligamento de sistema ou inoperável) em um determinado instante de tempo e não se preocupando quantas vezes esse sistema falhou em um intervalo de tempo de observação, então a nossa preocupação está voltada para a disponibilidade do evento topo.

A Confiabilidade e a Disponibilidade e outros parâmetros devem ser determinados também para os eventos intermediários. Diversos tipos de taxas de falhas podem ser considerados durante uma análise quantitativa da árvore. O fato de se adotar estas taxas constantes não resulta que o sistema possua também uma taxa de falha constante. O estudo quantitativo para estar completo, deve passar por considerações em estruturas coerentes, sistemas não-reparáveis e sistemas reparáveis, sistemas em manutenção periódica, certos métodos de análise, limitações da análise quantitativa, e um estudo amplo sobre análise de incertezas.

Um estudo detalhado deve ser dado à Análise de Causas Comum (“Common Cause Analysis”) e Análise de Importância (“Importance Analysis”). Um evento ou mecanismo que pode causar mais do que uma falha (no evento terminal) simultaneamente é denominada de causa comum, e as falhas são denominadas de falhas de causa comum. Alguns eventos de causas comum não induzem falhas de componentes, mas podem degradá-los e assim as probabilidades de falhas simultâneas fica aumentada. As falhas de causas comum são os principais responsáveis pelo aumento de não-confiabilidade do sistema e de probabilidades de acidentes. É importante verificar se a presença de causas comum afeta o sistema e então tomar medidas para removê-las ou quantificar os efeitos de falhas de causas comum, e assegurar que a não-confiabilidade do sistema, a indisponibilidade, e as probabilidades de acidentes estejam dentro de limites de projeto.

Existe toda uma metodologia para analisar as falhas de causa comum [ver ref. 52]. Por outro lado, se a presença destas falhas afeta um grande número de

componentes, a simples inclusão aumenta expressivamente o tamanho da árvore. A solução é fazer um tratamento separado, após a análise da árvore de falhas do sistema. Um estudo completo deve passar por um (i) estudo preliminar de causas comum, (ii) uma análise qualitativa, (iii) uma análise quantitativa, (iv) um tratamento de árvores (FTA) com um número grande de cortes mínimos, e (v) pelo desenvolvimento de ações corretivas devido à presença de falhas de causas comum [52].

A análise qualitativa de uma FT fornece informações sobre como uma falha do sistema pode ocorrer e como assegurar o sucesso do sistema. Fornece, ainda, a probabilidade de falha do sistema, a probabilidade do evento topo, proporcionando a decisão quanto à definição do sistema possuir desempenho aceitável (confiabilidade, disponibilidade e/ou segurança) ou necessitar de modificações. A análise de importância, verifica a contribuição de cada componente quanto a confiabilidade, indisponibilidade e segurança do sistema. Uma alta probabilidade de falha de um componente não necessariamente tem alta contribuição para o sistema. Depende da probabilidade e da configuração do sistema.

A análise de importância pode ou não ser realizada em conjunto com o estudo de confiabilidade de um sistema. Depende do objetivo e propósito do projeto de análise de confiabilidade. A análise não é importante se o objetivo do projeto é apenas determinar as probabilidades de acidente, a não-confiabilidade, ou a indisponibilidade do sistema. Ela será necessária, quando se deseja determinar confiabilidades específicas, estratégias de otimização da confiabilidade, e estratégias de manutenção baseada na confiabilidade. Um estudo completo sobre análise de importância deve passar por (i) uma avaliação qualitativa do ranqueamento dos componentes, (ii) pelas medidas quantitativas de importância, (iii) algumas medidas de importância do tipo para cortes mínimos, eventos terminais, e componentes em geral [52].

Como ilustração dos métodos discutidos sobre como determinar os cortes mínimos e o evento topo probabilístico, será apresentado um exemplo para demonstrar o processo de redução e quantificação da árvore de falhas. A árvore de falhas, para este exemplo, pode ser vista na figura 3.1, no final do capítulo. Os dados de entrada do tipo alfanumérico são mostrados. Este capítulo utiliza a notação de + para $\cup$ e * para $\cap$:

TOP AND GATE1 GATE2 Equação 3.3

GATE1 OR FT-N/M-1 FT-N/M-2 FT-N/M-3 Equação 3.4

GATE2 OR B1 B3 B4 Equação 3.5

GATE3 OR B2 B4 Equação 3.6

FT-N/M-1 AND GATE3 B3 B5 Equação 3.7

FT-N/M-2 AND GATE3 B1 Equação 3.8

FT-N/M-3 AND B3 B5 B1 Equação 3.9

Geração de cortes Mínimos (“Top-down approach”)

- nesta parte os cortes mínimos são obtidos utilizando a abordagem de movimentar-se para níveis inferiores na árvore. Os passos serão descritos de forma a esclarecer em detalhes todos os cálculos. Na prática, vários destes passos podem ser realizados juntos.

Passo 1 (TOP):

No início do algoritmo, o portão TOP é substituído pelos seus dados de entrada. Se o portão TOP é um portão OR, então os dados de entrada são colocados em uma coluna. Se o portão TOP é um portão AND os dados são colocados na mesma linha. Então, o primeiro passo é o seguinte:

GATE1 GATE2 Equação 3.10

Passo2 (GATE1):

neste passo, GATE1 é substituído pelos seus três dados de entrada. Sendo GATE1 do tipo OR cada dado de entrada torna-se uma coluna. Isto resulta em:

FT-N/M-1 GATE2

Equação 3.11

FT-N/M-2 GATE2

Equação 3.12

FT-N/M-3 GATE2

Equação 3.13

Passo 3 (FT-N/M-1):

Neste passo, FT-N/M-1 é substituído pelos seus dados de entrada GATE3, B3 e B5. Somente a primeira linha é modificada pois o portão é do tipo AND. Os resultados são:

B3 B5 GATE2 GATE3

Equação 3.14

FT-N/M-2 GATE2

Equação 3.15

FT-N/M-3 GATE2

Equação 3.16

Passo 4 (FT-N/M-2):

O próximo, FT-N/M-2 é expandido. É um portão AND e substituindo seus dados de entrada por linha. Os resultados deste passo é:

B3 B5 GATE2 GATE3

Equação 3.17

B1 GATE2 GATE3

Equação 3.18

FT-N/M-3 GATE2

Equação 3.19

Passo 5 (FT-N/M-3):

O portão FT-N/M-3 é seleccionado para ser processado. É um portão do tipo AND, e o resultado fica:

B3 B5 GATE2 GATE3

Equação 3.20

B1 GATE2 GATE3

Equação 3.21

B1 B3 B5 GATE2

Equação 3.22

Passo 6 (GATE 3):

O portão GATE 3 é seleccionado para expansão. O portão GATE 3 é do tipo OR com dois dados de entrada. O resultado é:

B2 B3 B5 GATE2 (substitui GATE3 por B2) Equação 3.23

B1 B2 GATE2 (substitui GATE3 por B2) Equação 3.24

B3 B4 B5 GATE2 (substitui GATE3 por B4) Equação 3.25

B1 B4 GATE2 (substitui GATE3 por B4) Equação 3.26

B1 B3 B5 GATE2 (não envolve GATE3) Equação 3.27

Passo 7 (GATE 2):

Neste passo GATE2 é processado. O portão GATE2 é do tipo OR com três dados de entrada. O resultado é:

B2 B3 B5 B1 Equação 3.28

B1 B2 B1 Equação 3.29

B3 B4 B5 B1 (substitui GATE2 por B1) Equação 3.30

B4 B1 B1 Equação 3.31

B1 B3 B5 B1 Equação 3.32

B2 B3 B5 B3 Equação 3.33

B1 B2 B3 Equação 3.34

B3 B4 B5 B3 (substitui GATE2 por B3) Equação 3.35

B1 B4 B3 Equação 3.36

B1 B3 B5 B3 Equação 3.37

$$B2 B3 B5 B4 \quad \text{Equação 3.38}$$

$$B1 B2 B4 \quad \text{Equação 3.39}$$

$$B3 B4 B5 B4 \quad (\text{substitui GATE2 por B4}) \quad \text{Equação 3.40}$$

$$B1 B4 B4 \quad \text{Equação 3.41}$$

$$B1 B3 B5 B4 \quad \text{Equação 3.42}$$

Passo 8 (“Idempotence” $A * A = A$)

Nesta etapa todos os portões foram eliminados e somente eventos básicos estão presentes. O próximo passo é aplicar a lei de “idempotence”, $A * A = A$. Isto resulta em:

$$B2 B3 B5 B1 = B1 B2 B3 B5 \quad \text{Equação 3.43}$$

$$B1 B2 B1 = B1 B2 \quad \text{Equação 3.44}$$

$$B3 B4 B5 B1 = B1 B3 B4 B5 \quad \text{Equação 3.45}$$

$$B4 B1 B1 = B1 B4 \quad \text{Equação 3.46}$$

$$B1 B3 B5 B1 = B1 B3 B5 \quad \text{Equação 3.47}$$

$$B2 B3 B5 B3 = B2 B3 B5 \quad \text{Equação 3.48}$$

$$B1 B2 B3 = B1 B2 B3 \quad \text{Equação 3.49}$$

$$B3 B4 B5 B3 = B3 B4 B5 \quad \text{Equação 3.50}$$

$$B1 B4 B3 = B1 B3 B4 \quad \text{Equação 3.51}$$

$$B1 B3 B5 B3 = B1 B3 B5 \quad \text{Equação 3.52}$$

$$B2 B3 B5 B4 = B2 B3 B4 B5 \quad \text{Equação 3.53}$$

$$B1 B2 B4 = B1 B2 B4 \quad \text{Equação 3.54}$$

$$B3 B4 B5 B4 = B3 B4 B5 \quad \text{Equação 3.55}$$

$$B1 B4 B4 = B1 B4 \quad \text{Equação 3.56}$$

$$B1 B3 B5 B4 = B1 B3 B4 B5 \quad \text{Equação 3.57}$$

Passo 9 (Absorção $A+(A*B) = A$)

O próximo passo é o da absorção. Isto é, todos os cortes considerados como não mínimos, devem ser eliminados, bem como os termos duplicados.

B1 B2		Equação 3.58
B1 B2 B3	eliminado por B1 B2	Equação 3.59
B1 B2 B3 B5	eliminado por B1 B2	Equação 3.60
B1 B2 B4	eliminado por B1 B2	Equação 3.61
B1 B3 B4	eliminado por B1 B4	Equação 3.62
B1 B3 B4 B5	eliminado por B1 B4	Equação 3.63
B1 B3 B4 B5	eliminado por B1 B4	Equação 3.64
B1 B3 B5		Equação 3.65
B1 B3 B5	corte mínimo repetido	Equação 3.66
B1 B4		Equação 3.67
B1 B4		Equação 3.68
B2 B3 B4 B5	eliminado por B2 B3 B5	Equação 3.69
B2 B3 B5		Equação 3.70
B3 B4 B5		Equação 3.71
B3 B4 B5	corte mínimo repetido	Equação 3.72

Passo 10 (Cortes mínimos finais):

Os cinco conjuntos finais são os cortes mínimos para este exemplo. Eles são:

B1 B2 Equação 3.73

B1 B4 Equação 3.74

B1 B3 B5 Equação 3.75

B2 B3 B5 Equação 3.76

B3 B4 B5 Equação 3.77

Equação Booleana para árvore de falhas

Nesta parte a forma da equação booleana da árvore de falhas será utilizada para obter os cortes mínimos. Os passos seguintes não são a única forma das equações serem combinadas e reduzidas. Os diversos passos apresentados podem ser realizados e combinados simultaneamente. Estes passos foram apresentados para ilustrar os vários conceitos e mostrar como eles se comparam ao método do algoritmo ilustrado na parte anterior.

A forma da equação para esta árvore é:

$TOP = GATE1 * GATE2$ Equação 3.78

$GATE1 = FT-N/M-1 + FT-N/M-2 + FT-N/M-3$ Equação 3.79

$GATE2 = B1 + B3 + B4$ Equação 3.80

$GATE3 = B2 + B4$ Equação 3.81

$FT-N/M-1 = GATE3 * B3 * B5$ Equação 3.82

$FT-N/M-2 = GATE3 * B1$ Equação 3.83

$FT-N/M-3 = B1 * B3 * B5$ Equação 3.84

Passo 1:

O primeiro passo é iniciar com a equação do TOP:

$$TOP = GATE1 * GATE2.$$

Equação 3.85

Passo 2:

Neste passo GATE1 e GATE2 são substituídos pelos seus dados de entrada. O seguinte resultado é obtido:

$$TOP = (FT-N/M-1 + FT-N/M-2 + FT-N/M-3) * (B1 + B3 + B4).$$

Equação 3.86

Passo 3:

Neste passo FT-N/M-1, FT-N/M-2 e FT-N/M-3, são substituídos pelos seus dados de entrada para resultar em:

$$TOP = (GATE3*B3*B5+ GATE3*B1+B1*B3*B5)*(B1 + B3 + B5)$$

Equação 3.87

Passo 4:

Na próxima o GATE3 é substituído por seus dados de entrada

$$TOP =$$

$$(B1+B3B4)*[(B2 + B4)(B3*B5)+(B2+B4)*B1+B1*B3*B5]$$

Equação 3.88

Neste ponto todos os portões são substituídos pelos seus dados de entrada, e a equação é constituída apenas de eventos básicos.

Passo 5:

O próximo passo é expandir e combinar os termos para produzir:

$$TOP =$$

$$(B1+B3+B4)* (B2*B3*B5+B3*B4*B5+B1*B2+B1*B4+B*B3*B5)$$

Equação 3.89

Passo 6:

Os termos do primeiro parêntesis são expandidos para produzir:

$$\begin{aligned} \text{TOP} = & B1*(B2*B3*B5+B3*B4*B5 \ B1*B2+B1*B4 \ B1*B3*B5) \\ & + B3* (B2*B3*B5+B3*B4*B5+B1*B2+B1*B4+B1*B3*B5) \\ & + B4 *(B2*B3*B5+B3*B4*B5+B1*B2+B1*B4+B1*B3*B5) \end{aligned} \quad \text{Equação 3.90}$$

Passo 7:

Cada termo deve ser expandido para produzir:

$$\begin{aligned} \text{TOP} = & B1*B2*B3*B5 + B1*B3*B4*B5 + B1*B1*B2 + B1*B1*B4 \\ & + B1*B1*B3*B5+ B3*B2*B3*B5 + B3*B3*B4*B5 + B1*B2*B3 \\ & + B1*B3*B4 + B1*B3*B3*B5+ B2*B3*B4*B5 + B3*B4*B4*B5 \\ & + B1*B2*B4 + B1*B4*B4 + B1*B3+B4*B5 \end{aligned} \quad \text{Equação 3.91}$$

Passo 8 (“Idempotence”):

A lei de “idempotence” ($A*A = A$) deve ser aplicada para produzir:

$$\begin{aligned} \text{TOP} = & B1*B2*B3*B5 + B1*B3*B4*B5 + B1*B2 + B1*B4 + B1*B3*B5 \\ & + B2*B3*B5 + B3*B4*B5 + B1*B2*B3 + B1*B3*B4 + B1*B3*B5 \\ & + B2*B3*B4*B5 + B3*B4*B5 + B1*B2*B4 + B1*B4 \\ & + B1*B3*B4*B5 \end{aligned} \quad \text{Equação 3.92}$$

Páso 9 (Absorção):

Finalmente, os cortes não mínimos são retirados da expressão. Os termos que são eliminados são facilmente observados na equação seguinte (forma reduzida).

$$\begin{aligned}
TOP = & B1*B2*B3*B5 + B1*B3*B4*B5 + B1*B2 + B1*B4 + B1*B3*B5 \\
& + B2*B3*B5 + B3*B4*B5 + B1*B2*B3 + B1*B3*B4 + B1*B3*B5 \\
& + B2*B3*B4*B5 + B3*B4*B5 + B1*B2*B4 + \\
& B1*B4 + B1*B3*B4*B5
\end{aligned}$$

Equação 3.93

A equação de cortes mínimos final é:

$$TOP = B1*B2 + B1*B4 + B1*B3*B5 + B2*B3*B5 + B3*B4*B5.$$

Equação 3.94

Esta é exatamente a mesma equação de cortes mínimos obtida no caso anterior de algoritmo.

A quantificação do evento topo após simplificações do tipo, eventos básicos estatisticamente independentes, permite que o valor do evento topo seja determinado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
P[TOP] = & P[B1*B2] + P[B1*B4] + P[B1*B3*B5] \\
& + P[B2*B3*B5] + P[B3*B4*B5]
\end{aligned}$$

Equação 3.95

3.5 - Códigos Computacionais

Quanto aos programas computacionais mais populares, existem para a análise qualitativa de árvore de falhas os seguintes: FTAP, MICSUP, PL-MOD, RAS, SETS.

WAMCUT, E WAMCUTII. Para área de análise quantitativa temos o BACFIRE, BOUNDS, ICARUS, MOCARS, PL-MOD, RAS, SAMPLE, SETS, SPASM, WAMBAM, WAMCUT, e WAMCUTII.

Todos estes códigos computacionais foram desenvolvidos entre 1975 e 1981, ou seja, relativamente antigos. As descrições detalhadas de cada um e outros menos relevantes na área de análise probabilística de segurança podem ser encontradas em documento editado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Alguns possuem atualizações, como no caso do WAMCUT-II. Um dos mais recentes e que tem sofrido constantes atualizações desde seu lançamento, em 1987, é o IRRAS [41]. Este programa desenvolvido pela “U.S. Nuclear Regulatory Commission”, é empregado para cálculo de risco total, cálculo de incertezas e estudo de sensibilidade em centrais nucleares de potência.

Os programas mais atuais utilizam conceitos de Programação Orientada à Objeto (OOP - “Object Oriented Program”) e/ou sistemas baseados em conhecimento (“Expert System”) [40]. Neste caso, e recentemente desenvolvido [32], em 1994, está o FTAES (“Fault Tree Analysis Expert System”) que possui características especificamente associadas à cálculo probabilístico, não possuindo tratamento fuzzy para os dados. Foi desenvolvido no ambiente de programação conhecido como Smart Element 2.1, de propriedade da empresa Neuron Data.

Os conceitos e fundamentos aqui apresentados, servem de orientação quanto aos conceitos mais importantes empregados e abordados neste trabalho de tese, e os detalhes sobre a aplicação dos mesmos, serão apresentados no capítulo 5, quando será discutido a implementação dos modelos empregados na criação do aplicativo desenvolvido neste trabalho.

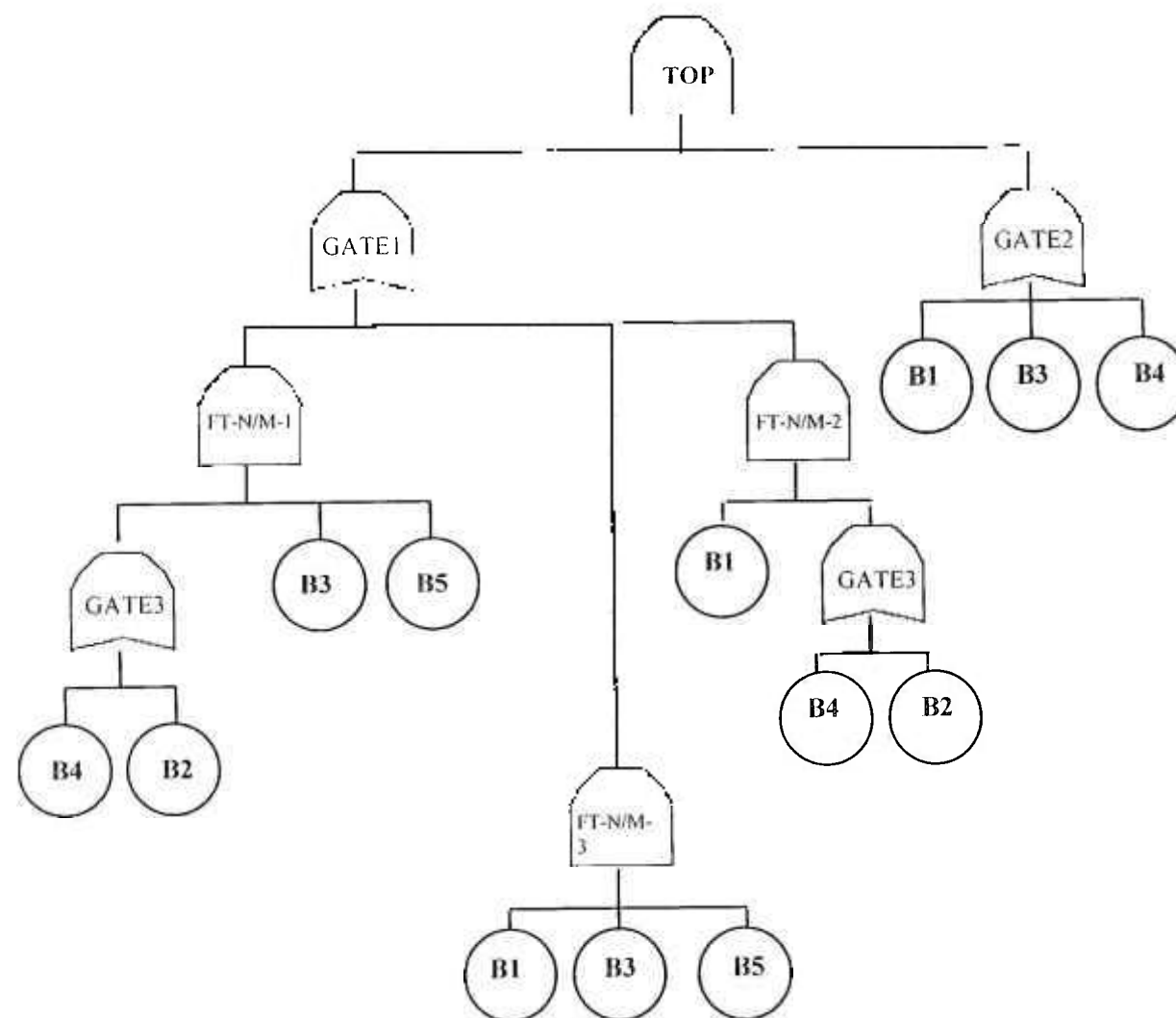


Figura 3.1 - Gráfico da árvore de falhas para cálculo de cortes mínimos

4. FUZZIFICAÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS E ANÁLISE DE INCERTEZAS

4.1 - Análise da Árvore de Falhas Utilizando Falhas Possibilísticas

O objetivo deste item é apresentar alguns conceitos e fundamentos, no sentido de formar uma base de conhecimento para o entendimento da metodologia empregada neste trabalho de tese. Por outro lado, funciona como uma ponte entre o capítulo 2 e a descrição de metodologia apresentada no item 4.2.

Durante a análise convencional utilizando árvore de falhas baseada em probabilidades, em muitos sistemas de engenharia, a informação vaga sobre um dado componente, é frequentemente ignorada, principalmente em interfaces homem-máquina. Para compensar esta característica, a teoria de conjuntos fuzzy é aplicada a análise de árvore de falhas. Pode-se utilizar uma função **triangular** (definida através dos pontos $(a,0)$, $(b,1)$ e $(c,0)$), para representar a possibilidade de falha, onde fica registrado então o desvio de comportamento do evento básico de um sistema. Para realizar operações com conjuntos fuzzy, o princípio de extensão é utilizado para calcular a possibilidade de falha do evento topo de uma árvore.

A eficiência humana é afetada em muitos fatores, e entre eles podem ser citados, o nível de esgotamento, experiência e conhecimento inadequado, habilidade para cognição, e outros. As taxas de falhas exatas dos componentes de um sistema, ficam difíceis de serem avaliadas pelo fato do comportamento humano imprevisível e pela informação vaga do próprio funcionamento do sistema. A análise convencional (“crisp”) encontra grande dificuldade para modelar as taxas de falhas dos componentes do sistema, quando existe imprecisão e uma informação vaga sobre o sistema.

Para avaliar a importância de diferentes eventos básicos, pode-se definir um índice de importância baseado em possibilidade fuzzy para representar a contribuição de um evento básico para ocorrência do evento topo da árvore de falhas. Por outro lado, utilizando este índice, pode-se estabelecer uma maneira de ordenar estes componentes, baseada na importância relativa dos mesmos para contribuição geral do sistema ao qual

eles pertençam. Os números fuzzy representados por funções triangulares (NFFT), utilizando conceito de maximização e minimização de conjunto, é uma técnica boa.

Este tipo de abordagem [57], precede àquela apresentada neste trabalho como proposta de tese, e será descrita mais em detalhes no sentido de formar uma base de conhecimento para a discussão posterior.

Os (i) números fuzzy, as operações de (ii) soma, (iii) subtração e (iv) negação e (v) multiplicação com números fuzzy e o (vi) ordenamento dos números fuzzy baseado em conjuntos máximos e mínimos, podem ser resumidos em suas expressões finais por:

$$(i) A = (c, a, b), \quad \text{Equação 4.1}$$

$$(ii) A_i + A_j = (c_i + c_j, a_i + a_j, b_i + b_j), \quad \text{Equação 4.2}$$

$$(iii) A_i - A_j = (c_i - b_j, a_i - a_j, b_i - c_j) \quad \text{Equação 4.3}$$

$$(iv) -A_j = (-b_j, -a_j, -c_j), \text{ espec. } \sim 1 = (1, 1, 1) \text{ e } \sim 1 - A_j = (1 - b_j, 1 - a_j, 1 - c_j) \quad \text{Equação 4.4}$$

$$(v) A_i \times A_j = (c_i c_j, a_i a_j, b_i b_j), \text{ por aproximação} \quad \text{Equação 4.5}$$

$$(vi) R(A_j) = k [(b_i - x_i) / (x_2 - x_1 - a_i + b_i)] + (1 - k) [1 - (x_2 - c_i) / (x_2 - x_1 + a_i - c_i)], \quad \text{Equação 4.6}$$

onde o valor de k é um índice de otimismo e pode ser manipulado para refletir a atitude de pessimismo ou otimismo de quem é responsável pelo processo decisório e

$$x_1 = \min \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \text{ e } x_2 = \max \{b_1, b_2, \dots, b_n\}. \quad \text{Equação 4.7}$$

Repare que neste tipo de abordagem o ordenamento é baseado nos valores máximos e mínimos dos eventos, o que motivou a recomendação de uma abordagem inteiramente nova e utilizada no trabalho de tese.

O conceito de possibilidade de falha pode ser aplicado para substituir a taxa de falha durante a análise feita com a árvore de falhas. A possibilidade de falha pode ser definida por um "número fuzzy" no intervalo de $[0, 1]$, com qualquer forma de função

de pertinência. O motivo de se adotar este tipo de função de pertinência triangular, é por ser intuitivamente fácil para se entender e avaliar a eficiência de sistemas.

Diversas técnicas de medida de precisão já foram desenvolvidas [52] e a eficiência humana imprevisível bem como a natureza vaga sobre qualquer informação do sistema devem ser representados com os valores definidos como limites inferior e limite superior (c_i e b_i) descritos acima. A determinação destes limites pode ser baseada em bibliografia especializada ou obtida diretamente à partir da avaliação do especialista. Os fatores para estimar os limites inferior e superior em um sistema homem-máquina, são indicados na Tabela 4.1.

Taxa de Falha	Limite Inferior	Limite Superior
$0.1 < F_r$	$Fr / 5$	$2 \times Fr \sim 5 \times Fr$
$0.001 < Fr < 0.01$	$Fr / 3$	$3 \times Fr$
$Fr < 0.001$	$Fr / 10$	$10 \times Fr$

Tabela 4.1 - Critérios para estimar limites superior e inferior da taxa de falha estimada.

Se os valores de probabilidade de falhas dos componentes do sistema, podem ser estimados de dados históricos, a possibilidade de falha dos componentes é expressa utilizando a tabela acima e desta forma pode-se representar o número **a** como (**c**, **a**, **b**), onde **a** é valor possível e **c** e **b** os valores inferior e superior. Caso os dados não sejam conhecidos, a possibilidade de falha para os componentes do sistema pode ser subjetivamente estimada baseada em opinião de especialistas utilizando, em certos casos, “números fuzzy de funções triangulares”.

Falta verificar o procedimento de “fuzzificação” da árvore de falhas através dos portões AND e OR. Observe, por exemplo, que se a operação fuzzy de multiplicação é utilizada, a possibilidade de falha para o caso de um portão (i) AND e para um portão (ii) OR, em uma situação típica onde é empregada uma árvore simplificada com um portão e vários eventos básicos, a expressão final para o evento topo resulta em:

$$P_T^A = P_{E1} \times P_{E2} \times \dots \times P_{En} \quad \text{Equação 4.8}$$

$$P_T^0 = \sim 1 - (\sim 1 - P_{E1}) \times (\sim 1 - P_{E2}) \times \dots \times (\sim 1 - P_{En}) , \quad \text{Equação 4.9}$$

$$\text{onde } \sim 1 = (1, 1, 1). \quad \text{Equação 4.10}$$

O índice ou medida de importância fuzzy, conforme dito anteriormente, avalia a contribuição de diferentes eventos básicos para o evento topo, e é o índice de importância baseado na possibilidade. Determinando-se a expressão final do evento topo de uma árvore de falhas, e considerando que a possibilidade de falha do evento topo é uma função que aumenta com relação à possibilidade de falha de qualquer evento básico, então $P_T > P_{Ti}$, onde P_{Ti} vem a ser a possibilidade de falha do evento topo T, na qual a possibilidade de falha do evento básico i-ésimo é eliminada, e P_T é a possibilidade de falha envolvendo n eventos básicos. Baseado nesta propriedade, é definida uma expressão $D(P_T, P_{Ti})$, que determina a diferença entre P_T e P_{Ti} , para indicar o grau de melhoramento após eliminar a possibilidade de ocorrência de falha do i-ésimo evento básico. A expressão final abaixo define esta idéia.

$$D(P_T, P_{Ti}) = R(P_T, P_{Ti}) \quad \text{Equação 4.11}$$

Desde que a diferença seja uma função triangular e adotando um valor otimista para o índice k ($k = 0.5$), os índices de importância fuzzy de todos os eventos básicos podem ser determinados desta expressão acima. A prioridade de importância dos eventos básicos pode ser determinada. O maior valor de D, é o evento básico mais importante.

A conclusão final deste tipo de abordagem pode ser resumido em 4 itens, quais sejam:

- (i) Ao invés de se utilizar probabilidade de falha, a possibilidade de falha é utilizada para caracterizar a ocorrência de falhas dos eventos do sistema. Pode expressar efetivamente a natureza vaga das informações sobre o sistema, as diferenças entre eficiência humana bem como o grau de estabilidade dos componentes.

- (ii) O uso de funções triangulares é altamente recomendável para representar a possibilidade de falha dos eventos básicos em um ambiente fuzzy.
- (iii) O índice de importância fuzzy o qual é baseado no nível de redução de possibilidade de falha do evento topo após eliminar a ocorrência de falha do evento básico, pode ser uma informação útil para melhorar a segurança geral do sistema.
- (iv) Quando a árvore de falhas é construída, a determinação da possibilidade de falha do evento topo e a avaliação de importância do evento básico podem ser facilmente implementadas em computadores. Após determinar as possibilidades de falhas de todos os eventos básicos, a pessoa que é responsável por tomada de decisão conta com a possibilidade de falha do evento topo e a prioridade de importância dos eventos básicos de forma automática.

Em seguida é apresentada a abordagem nova, onde a propriedade de distância Euclideana entre dois pontos é utilizada ao invés de maximização e minimização conforme apresentado acima.

4.2 - Análise Possibilística pelo Método Euclideano

Foi modificado o método de abordagem, mas a análise por árvore de falhas (FTA - "Fault Tree Analysis") é a técnica gráfica e lógica utilizada neste estudo, para avaliar a probabilidade de um acidente resultante de combinações de eventos falhados e falhos. Sendo muito utilizada particularmente em sistemas como instalações nucleares de potência, onde as informações disponíveis sobre os componentes são insuficientes para inferências estatísticas ou possuem uma faixa de variação muito grande. P.S. Jackson et al. 1981 [45], é de vital importância a definição permanente de novas abordagens. É bom lembrar que, para incorporar a variação nos valores estimados, as taxas de falhas ou as probabilidades de falhas devem ser tratadas como variáveis randômicas com distribuição de probabilidades conhecidas [WASH 1400, 1975]. Isto requer, naturalmente, que os dados estejam disponíveis de forma a permitir que as distribuições de probabilidades sejam deduzidas. O método fuzzy novamente será

escolhido em situações onde poucas informações estejam disponíveis com flutuações nos parâmetros [Misra et al - 1990 and T. Onisawa et al - 1990].

Será apresentado uma retrospectiva de abordagens, no sentido de posicionar o item anteriormente apresentado e o método adotado neste trabalho de tese.

Na análise de incerteza convencional, a estimativa pontual de eventos primários são substituídas com distribuições de probabilidades. À partir daí, deriva-se a distribuição de probabilidade para a probabilidade de ocorrência do evento topo na árvore de falha. Entretanto, qualquer método analítico deve ser difícil numa situação como esta, e uma simulação deste tipo requer tempos computacionais grandes.

A teoria de conjuntos fuzzy (FST - "Fuzzy Set Theory") desenvolvida por Zadeh - 1965, é aplicada em confiabilidade e análise de árvore de falhas [D. Singer - 1990 e H. Tanaka et al - 1983]. Nesta fase, a FST será adotada para efeito de análise das incertezas na FTA. Ao invés de considerar os dados de entrada como variáveis randômicas eles são tratados como um número fuzzy, de acordo com a abordagem feita no item anterior, e as incertezas associadas propagadas até a determinação do evento topo. Em trabalhos recentes [K.B. Misra and Weber - 1990 e D. Singer-1990] sobre a aplicação da teoria dos conjuntos fuzzy em árvore de falhas, as probabilidades de falha dos componentes são consideradas como probabilidades fuzzy e o **princípio de extensão** é utilizado novamente para as operações algébricas. Entretanto, estas considerações não podem ser aplicadas à uma árvore de falhas com eventos repetidos e de certa forma também utilizará grande tempo de computação. Um método simples para análise de árvore de falhas [K.P. Soman e K.B. Misra, 1993] foi definido, e é baseado no conceito de α -cut, também conhecido como **identidade resolução**. Neste trabalho de tese, o conceito de α -cut é utilizado para o cálculo de probabilidade de falha do evento topo, e as considerações serão apresentadas mais adiante. A comparação de ambos os métodos será apresentada no final.

Na árvore de falhas (FTA), o conceito de Importância ("importance") é utilizado para se avaliar em quanto o evento básico contribui para determinação do evento topo. Uma análise de importância geralmente é útil para futuras modificações de projeto no sistema. Muitas aplicações de Importância podem ser encontradas na

literatura, e a maioria delas são baseadas em conceitos probabilísticos. Em [Z. J. Pan e Ya-Chuan Tai, 1990] encontra-se um modelo para determinar a medida de importância de componentes básicos utilizando a variância da medida de importância. A simulação de **Monte-Carlo**, geralmente utilizada na determinação da variância da medida de importância, introduz suas próprias incertezas no modelo e somado à isto, também gasta mais tempo de computação. Se os componentes do sistema são muitos, costuma-se repetir o procedimento de cálculo muitas vezes. De forma semelhante, espera-se a mesma medida de incerteza para componentes que tenham os mesmos parâmetros de distribuição de probabilidade, quando no caso os resultados são levemente diferentes devido à própria simulação de Monte-Carlo.

Entretanto, estes métodos não são adequados para as considerações fuzzy. A importância Fuzzy que é utilizada na análise da FTA é desenvolvida em [H. Furuta e N. Shiraishi, 1984] e é equivalente a importância estrutural. A outra medida de importância, citada no item anterior, foi sugerida por [G.S. Liang and M.J.J. Wang, 1993] e ficou conhecida como Índice de Importância Fuzzy (fuzzy “importance index” - FII) e sua determinação, conforme já discutida, é baseada no método de ordenamento dos NFFT com conjuntos minimizados e maximizados. O método aqui utilizado é simples e foi proposto por [P. V. Suresh et al, 1996] para avaliar a medida de importância que é denominada de **Medida de Importância Fuzzy** (“fuzzy importance measure” - FIM) e é baseada em considerações sobre a distância Euclideana.

Como a identificação do componente crítico é muito importante, é extremamente essencial a determinação da contribuição máxima de incerteza na determinação da incerteza no evento topo. Um novo método também para este caso [P. V. Suresh et al, 1996] é proposto para medida de importância na incerteza, que é denominada de **Medida de Incerteza de Importância Fuzzy** (“fuzzy uncertainty importance measure” - FUIM). Este método proporciona uma importante alteração na redução da incerteza, onde são identificados fundamentalmente as fontes de incertezas que causam mais impacto na incerteza do evento topo.

CONSIDERAÇÕES PROBABILÍSTICA PARA ANÁLISE DE INCERTEZA.

Em situações onde o sistema possua um grande número de componentes, falhas podem ocorrer devido à combinações diversas de falhas envolvendo um ou mais componentes. Este relacionamento entre falha de sistema e componentes é representado em árvores de falha. As incertezas nos dados dos componentes são propagadas através da árvore de falha para se obter a incerteza na probabilidade de falha do sistema. As considerações probabilísticas atuais para análise de incertezas consiste em tratar as taxas de falhas como uma variável randômica representada com uma distribuição de probabilidade específica. Uma distribuição log-normal frequentemente é utilizada [WASH-1400, 1975], a qual é representada utilizando uma mediana e um fator de erro, quando existem dados suficientes para um dado componente. O intervalo de propagação é caracterizado utilizando simulação de Monte-Carlo. Como já foi dito e a despeito das incertezas existentes nos dados e nos modelos, surge outra e devido ao próprio método de simulação usualmente adotado.

Na análise de árvore de falhas, as probabilidades de falha do sistema podem ser determinadas utilizando-se os cortes mínimos. A função de não-confiabilidade geral do sistema pode ser escrita como a soma dos produtos parciais da não-confiabilidade dos componentes. A probabilidade de falha do sistema é:

$$Q = f(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n) \quad \text{Equação 4.12}$$

onde q_i é a não-confiabilidade ou probabilidade de falha do componente i e n é o número total de componentes.

Em P.V. Suresh et al. 1996 [37], o módulo do programa de computador PSAPACK denominado de FTAP, programa para análise árvore de falhas, é utilizado para gerar os cortes mínimos e a estimativa pontual de probabilidade de falha do evento topo, e foi desenvolvido mais um programa computacional especificamente, e semelhante ao SAMPLE [WASH-1400, 1975], para obter o intervalo de confiança de 90% da probabilidade de falha do evento topo utilizando a simulação de Monte-Carlo.

CONSIDERAÇÕES FUZZY PARA ANÁLISE DE INCERTEZAS

As considerações probabilísticas para análise de incerteza basicamente depende da hipótese de uma função de distribuição da probabilidade de falha, que pode ser obtida somente quando existe um número suficiente de dados disponíveis de falha. Em seguida, essas distribuições são propagadas para níveis superiores na árvore de falhas, utilizando métodos de simulação para obter a distribuição de probabilidade do evento topo. Para superar algumas dificuldades, utiliza-se a teoria de conjuntos fuzzy [G.S. Liang and M.J.J. Wang - 1993 e D. Singer - 1990]. Na FST, o dado de entrada é tratado como um número fuzzy e a variabilidade é caracterizada pela **função de pertinência** que pode ser obtida baseada na informação disponível ou na opinião de especialista. A função de pertinência de cada conjunto fuzzy normalmente é adotada como uma função triangular ou trapezoidal e tratada como uma distribuição de possibilidade. Quando a não-confiabilidade de cada componente tiver uma estimativa pontual, a não-confiabilidade do evento topo também terá uma estimativa pontual. No trabalho de [P.V. Suresh et al. 1996], as probabilidades de falha dos componentes são adotadas como conjuntos fuzzy triangulares para incorporar as incertezas nos parâmetros. A função de pertinência triangular de um conjunto fuzzy é definida como

$$\mu_X(x) =$$

$$\max[0, 1 - |(x - x_1)/(x_2 - x_1)|], \quad x_1 \leq x \leq x_2, \quad \text{Equação 4.13}$$

$$1, \quad x = x_2, \quad \text{Equação 4.14}$$

$$\max[0, 1 - |(x_3 - x)/(x_3 - x_2)|], \quad x_2 \leq x \leq x_3, \quad \text{Equação 4.15}$$

$$0, \quad \text{outra situação.} \quad \text{Equação 4.16}$$

com

$$\mu_X(x_2) = 1, \quad \text{Equação 4.17}$$

$$\mu_X(x_1) = \mu_X(x_3) = 0.$$

Equação 4.18

e $[x_1, x_3]$ são os valores limites [inferior, superior] dos NFFT. Por exemplo, os limites inferior e superior devem ser obtidos do valor mediano pontual e do fator de erro (EF) da probabilidade de falha [G.S. Liang and Wang, 1993]. O limite inferior, o mediano, e o limite superior são definidos por:

$$x_1 = q_p/EF$$

Equação 4.19

$$x_2 = q_p,$$

Equação 4.20

$$x_3 = q_p \cdot EF,$$

Equação 4.21

onde q_p é o valor mediano pontual da probabilidade de falha. A avaliação fuzzy da probabilidade de falha do evento topo de uma árvore de falhas é feita utilizando o conceito de α -cut. O evento topo pode ser representado por um vetor $N \times 2$, onde N é o número de α -cuts.

MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA.

A identificação dos componentes críticos é essencial. Muitas medidas estão disponíveis em estudos probabilísticos tais como “risk achievement worth”, Importância Birnbaum, Importância Fussel-Vessel, e outras. Em [Z.J. Pan and Ya-Chuan Tai, 1988], uma metodologia foi apresentada para a medida de variância da importância utilizando simulação de Monte-Carlo. Na metodologia fuzzy, duas medidas diferentes de importância estão sendo definidas e como já anteriormente citadas são: (1) Medidas de Importância Fuzzy (2) Medidas de Incerteza de Importância Fuzzy, que serão em seguida discutidas.

4.2.1 - Medida de Importância Fuzzy (“Fuzzy Importance Measure”)

A avaliação da contribuição de diferentes eventos básicos é essencial para identificar os componentes críticos do sistema. A probabilidade de falha do evento topo com o componente i totalmente indisponível ($q_i = 1$) é:

$$Q_{q_i=1} = f(q_1, q_2, \dots, q_{i-1}, 1, q_{i+1}, \dots, q_n) \quad \text{Equação 4.22}$$

Semelhantemente quando o componente i está totalmente disponível,

$$Q_{q_i=0} = f(q_1, q_2, \dots, q_{i-1}, 0, q_{i+1}, \dots, q_n) \quad \text{Equação 4.23}$$

Então a contribuição total do componente i para a probabilidade de falha do sistema é a diferença entre $Q_{q_i=1}$ e $Q_{q_i=0}$ e é denominada de Birnbaum “importance” em metodologias convencionais. Em [Z.J.Pan and Ya-Chuan Tai, 1988] a medida de variância da importância é avaliada adotando-se o quadrado desta importância utilizando Monte-Carlo.

Entretanto, na análise fuzzy da árvore de falha $Q_{q_i=1}$ e $Q_{q_i=0}$, são números fuzzy e nem a estimativa pontual e a simulação de Monte-Carlo podem ser utilizadas. A Medida de Importância Fuzzy (FIM) é definida como:

$$FIM = ED [Q_{q_i=1}, Q_{q_i=0}], \quad \text{Equação 4.24}$$

onde $ED [Q_{q_i=1}, Q_{q_i=0}]$, é o valor da distância euclidiana entre dois conjuntos fuzzy A e B e é definido como:

$$ED [A, B] = \sum_{\alpha i=1,2,\dots,N} ((a_L - b_L)^2 + (a_U - b_U)^2)^{0.5} \alpha_i \quad \text{Equação 4.25}$$

onde a_L, a_U são os valores limites inferior e superior dos conjuntos fuzzy A para cada α -level.

4.2.2 - Medida de Importância de Incerteza Fuzzy (FUIM)

O valor de FUIM (“Fuzzy Uncertainty Importance Measure”) pode ser utilizado para identificar o componente crítico. Entretanto, é muito importante conhecer os componentes cujas incertezas de probabilidade de falha contribuem significativamente para a incerteza da probabilidade de falha do sistema. Isto auxiliará na decisão em definir de quais componentes devem ser obtidas mais informações, desde que as incertezas nas probabilidades de falhas calculadas possam ser reduzidas. A medida de importância de incerteza fuzzy, é proposta para identificar os componentes que contribuem com incerteza máxima para a incerteza do evento topo e é definida como:

$$FUIM = ED [Q, Q_i],$$

Equação 4.26

onde Q = probabilidade de falha do evento topo, e Q_i = probabilidade de falha do evento topo quando o fator de erro para o componente i é unitário ($EF_i = 1$), isto é, o parâmetro do evento básico tem um valor pontual ou valor exato.

Os conceitos apresentados no item 4.1 e 4.2 deste capítulo, serão utilizados no capítulo 5, e após a definição e implementação dos respectivos algoritmos, codificados em linguagem ObjectPascal, serão processados para se determinar então os valores aqui definidos.

5. IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS

Um dos ambientes mais utilizados atualmente para o desenvolvimento de aplicativos comerciais e/ou científicos é o programa DELPHI 3.0 da empresa Borland. Considerado como um ambiente do tipo RAD (“Rapid Application Development”), onde o usuário de maneira rápida e fácil elabora uma interface amigável de trabalho e possui como linguagem de programação uma extensão da linguagem Pascal denominada de ObjectPascal, totalmente orientada à objetos.

Na versão 3 este produto introduz em relação à versão anterior do código, várias melhorias. Possui tecnologia em ActiveX, desenvolvimento para Web e suporte total a Base de Dados. É apresentada em três tipos: a versão “Desktop” para pequenos aplicativos, a versão Development para programadores profissionais e a versão “Client/Server” para aplicativos corporativos com suporte pleno a banco de dados.

A escolha deste ambiente de programação para o desenvolvimento do FuzzyFTA, se deveu ao fato da característica RAD e ao suporte à banco de dados que facilita muito o trabalho de qualquer programador. Existe ainda a portabilidade dos aplicativos gerados neste ambiente, fortalecendo ainda mais a escolha deste ambiente de programação. A clareza da linguagem Object Pascal é outro fator importante se comparada, por exemplo, a C/C++. A facilidade de se encontrar livros nacionais e estrangeiros sobre o Delphi é enorme, bem como, um número significativo e crescente de usuários, quando comparados a outros, de diferentes ambientes de programação.

Entretanto, é bom lembrar que o mais importante realmente, são os algoritmos utilizados e não apenas a linguagem empregada para o desenvolvimento do projeto.

5.1 - Fases de implementação no FuzzyFTA

A primeira fase de elaboração do projeto, foi desenvolver as interfaces (“forms”), no sentido de estabelecer as funções que o sistema iria executar. A

apresentação dos resultados foi uma outra preocupação durante a definição das interfaces. Durante essa fase inicial do projeto FuzzyFTA existiu a preocupação da apresentação objetiva e clara para o usuário das informações fornecidas como dados de entrada e aquelas obtidas como resultados. Isso foi possível em grande parte ao conceito e uso de componentes disponíveis na barra de ferramentas do Delphi.

A fase seguinte foi destinada a definição dos algoritmos e implementação do aplicativo. Primeiramente, foi desenvolvido o algoritmo considerado básico para elaboração das etapas posteriores. As etapas podem ser divididas em (i) Probabilística e (ii) Fuzzy para a análise completa (“Full”) da árvore de falhas. Depois essa mesma estratégia foi empregada utilizando-a para a análise de árvore reduzida ou mais conhecida como árvores com cortes mínimos (MCS-“Minimal Cut Set”).

O cálculo do evento topo para parte probabilística foi desenvolvido utilizando o conceito de **recursividade**. Após a verificação dos resultados assim obtidos, vários testes foram feitos e em seguida, algumas modificações foram adotadas para implementar a segunda etapa, a de determinação do evento topo Fuzzy. Para o cálculo dos valores de Medidas de Importância Fuzzy (FIM - “Fuzzy Importance Measure”) e Medidas de Incertezas de Importância Fuzzy (FUIM - “Fuzzy Uncertainty Importance Measure”) foram necessárias alterações estruturais.

Essa estratégia anterior foi adotada no caso seguinte, o de árvores de falhas com Cortes Mínimos. O tratamento dado a cada algoritmo foi bastante modificado. Diversos testes de validação foram feitos no algoritmo básico, do evento topo probabilístico, para então desenvolver a segunda etapa, a do cálculo do evento topo Fuzzy da árvore de falhas, com cortes mínimos. Superada esta etapa, resta a determinação dos valores de FIM e FUIM com cortes mínimos.

Esses passos, foram importantes para tornar os algoritmos mais robustos. Algumas tabelas apresentadas nos formulários e ligadas a banco de dados, foram geradas utilizando as facilidades de manipulação de banco de dados, presentes no Delphi. Estas tabelas auxiliaram na construção física da Árvore de Falhas, através do processo de integridade referencial e de domínio existentes no Delphi. Por meio delas,

representou-se a ligação entre pais e filhos, ou seja, portões (“gates”) com eventos básicos e portões com portões. Os arquivos (.db) estão descritos à seguir:

BEvents - relaciona os dados de entrada sobre os eventos básicos do sistema.

EventNo - valores de “AlfaLevel” e de “TopEventFuzzyLower e UpperBound”.

“Gate” - apresenta todos os portões existentes na árvore, como dado de entrada.

PaiFilho - relaciona pais e filhos portões.

Tem - relaciona pais portões com filhos eventos básicos.

O projeto possui um total de 9 units e 9 forms, e são apresentados abaixo:

Unidades (“units”)

About - unidade para exibição de informações genéricas sobre o e-mail (“about”).

FFTA1 - unidade das principais “procedures”.

FFTA2 - unidade dos dados de entrada.

FFTA3 - unidade para entrada de dados dos eventos básicos.

FFTA4 - unidade para definição de construção da árvore de falhas.

FFTA6 - unidade para informações genéricas sobre o aplicativo (“about”).

FTA - unidade do projeto FuzzyFTA.

LogoMain - unidade do e-mail.

LogoStrs - unidade de e-mail.

Formulários (“Forms”)

AboutBox- formulário de informações genéricas sobre e-mail.

frmFTA1- formulário para edição dos resultados finais.

frmFTA2- formulário para visualização da árvore de falhas.

frmFTA3- formulário para entrada de dados dos eventos básicos.

frmFTA4- formulário para entrada de dados para construção da árvore de falhas.

frmFTA6 - formulário para informações genéricas sobre o aplicativo.

LogoAppForm - formulário sobre e-mail.

frmFTQrp - formulário para relatório dos valores de topo fuzzy.

frmrankgrp - formulário para relatório dos valores de ordenamento.

Existem tabelas associadas a cada arquivo (.db) e presentes nos formulários (form) do aplicativo. As tabelas utilizadas no FuzzyFTA estão descritas a seguir, e relacionandas para cada formulário do projeto.

frmFTA1 - tblFuzzyTop, tblEventNo: visualização de dados.

frmFTA2 - tblGates, tblGatesGates, tblGatesBEvents, tblBEvent: visualização.

frmFTA3 - tblBEvent: edição de dados.

frmFTA4 - tblGates, GatesGates, GatesBEvents: edição de dados.

5.1.1 - Tratamento da Árvore de Falhas completa

O diagrama abaixo visa facilitar o entendimento das etapas de cálculo descritas anteriormente tanto para o tratamento de árvores completas quanto ao tratamento feito em árvores com cortes mínimos (MCS).



Em seguida será apresentado a descrição, em linguagem ObjectPascal, de todas as etapas de construção dos algoritmos. Inicialmente, a definição de variáveis dos

algoritmos e os procedimentos a eles associados, constam basicamente na unidade FFTA1 correspondente ao formulário frmFTA1, onde os componentes botões com eventos (“OnClick”) estão presentes.

Nas primeiras linhas de código, seguindo a estrutura de uma **unit**, são descritos as interfaces em termos de rotinas de sistemas, constantes, tipos dos componentes presentes no formulário e outras declarações públicas, e implementações a nível de formulário.

Listagem 5.1 - tipos de componentes e declarações de tipos do formulário frmFTA1.

```
unit FFTA1;
interface
uses
  SysUtils, WinTypes, WinProcs, Messages, Classes, Graphics, Controls,
  Forms, Dialogs, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, Menus, FFTA3, FFTA4, DB,
  DBTables, Grids, DBGrids, MPlayer;
const
  NumBEvents = 500;

type
  TfrmFTA1 = class(TForm)

    procedure tblEventNoCalcFields(DataSet: TDataSet);
    procedure btnFUIMClick(Sender: TObject);
    procedure btnEmailClick(Sender: TObject);
    procedure btnTopMCSClick(Sender: TObject);
    procedure btnFuzzyTopMCSClick(Sender: TObject);
    procedure btnFIMmcsClick(Sender: TObject);
    procedure btnFUIMmcsClick(Sender: TObject);
    procedure btnDataClick(Sender: TObject);
  public
    procedure ConversaoDeBEventsParaFuzzyNumbers;
  end;
type
  TProb= array[1..150,1..2,1..11] of real;

var
  frmFTA1: TfrmFTA1;
  //declaracoes para fault tree FULL
  function calcula_topo(id_pai:integer):real;
  Procedure calcula_topoFuzzy(id_pai:integer;var valor_topo : Tvetor);
  procedure Produtorio(num_evento:integer; evento: TProb; var valor_produtorio:Tprodutorio );
  Procedure calcula_topoFuzzyNew(id_pai, num_ev:integer;var valor_topo : Tvetor);
```

```

procedure calcula_distanciaEuclideana(Lowerum, Lowerzero, Upperum,Upperzero: Tnum; i:integer;
var valor: Tvalor);
procedure calcula_rankFIM(valor: Tvalor;num_ev:integer; var rank_FIM: Tordem);
//declaracoes para fault tree MCS
function calcula_expressao_topo(id_pai:integer):string;
function aplicar_idempotence(valor_topo: string):string;
function aplicar_absorcao(valor_topo: string):string;
function distrib(valor:string; var nt:integer):Ttermos;
procedure ordena(valor: Ttermos; num_ev: integer; var valor2: Ttermos);
procedure ordenal(valor: string; knum_ev :integer; numev: integer; var valor2: string);
function aplicar_Soma(valor_topo: string): real;
function aplicar_SomaFuzzy(valor_topo:string): Tvetor;
function aplicar_SomaFuzzyNew(valor_topo: string; num_ev: integer): Tvetor;

implementation
uses FFTA2, FFTA6, LogoMain, FFTA5;
var
  vt:real;
  ev:integer;
.
{$R *.DFM}

```

Inicialmente a primeira etapa está associada a determinação do evento topo probabilístico. Para isso, um componente foi definido no formulário contendo as instruções de chamada de uma rotina pública para cálculo do evento topo probabilístico, e em seguida o valor resultante é exibido em outro componente (TEdit). A instrução de **floattostrF**, permite editar o resultado probabilístico com números significativos reduzidos, conforme pode ser visto na listagem 5.2:

Listagem 5.2 - linhas de código do evento OnClick do botão TopFull no frmFTA1.

```

procedure TfrmFTA1.btnTopFullClick(Sender: TObject);
var
  id_gate:integer;
  valor_topo:real;
begin
  with tblgates do begin
    id_gate:=fieldname('idgate').asInteger;
    valor_topo:=calcula_topo(id_gate);
    editProbabilisticTopEvent.text:=floattostrF(valor_topo,ffExponent,3,6);
  end;
end;

```

Para determinação do valor numérico do evento topo, uma função foi criada recebendo como argumento o valor do portão topo (“gate”), retornando apenas o valor probabilístico do evento topo. Na tabela `tblGatesGates` existe a relação entre pais e filhos “gates” de dependência. Em seguida, o conceito de recursividade permite a visualização de todos os “gates” pais até o último, onde não mais exista “gate” filho. Repare na linha de código onde existe a chamada da função outra vez. Feito isto, o algoritmo busca na tabela `tblGatesBEvents` o evento básico associado a este “gate” último, e verifica todos os eventos em cada nível da árvore. A utilização da função **GetBookMark** é um recurso do Delphi para armazenar o último registro da tabela lido, processar à partir deste ponto e depois retornar ao próximo registro.

A partir deste ponto é lido na tabela `tblBEvent` o valor probabilístico associado aos eventos encontrados em cada nível da árvore.

Terminada esta etapa, é lido o tipo, se o “gate” lido é **AND/OR**, de cada pai “gate” na tabela `tblGates`. Identificado o tipo, faz-se então a operação de soma ou multiplicação dependendo do tipo do “gate”.

Por apresentar uma estrutura recursiva, o algoritmo é muito interessante e simples servindo de base para os demais algoritmos do projeto.

Listagem 5.3 - linhas de código da função que calcula o evento topo probabilístico.

```
function calcula_topo(id_pai:integer):real;
var
  i, j, num_topo, no, ev, num_evento:integer;
  valor_topo, evento: Tvalor;
  total:real;
  id_gate, a:integer;
  tipo:string;
  pos:TBookMark;
begin
  with frmFTA1.tblGatesGates do begin
    num_topo:=1;
    first;
    while not eof do begin
      a:=id_pai;
      no:=fieldbyname('idpai').asInteger;
      pos:=GetBookMark;
```

```

if(no=a) then begin
    id_gate:=fieldbyname('idfilho').asInteger;
    valor_topo[num_topo]:=calcula_topo(id_gate);
    inc(num_topo);
end;
gotobookmark(pos);
next;
freebookmark(pos);
end;
end;
with frmFTa1.tblGatesBEvents do begin
    num_evento:=1;
    first;
    while not eof do begin
        ev:=fieldbyname('idgate').asInteger;
        if(ev=id_pai) then begin
            ev:=fieldbyname('idbevent').asInteger;
            frmFta1.tblbevent.locate('idbevent',ev,[]);
            evento[num_evento]:=frmFTa1.tblbevent.fieldbyname('probabilistic').asfloat;
            inc(num_evento);
        end;
        next;
    end;
end;
with frmFTa1.tblgates do begin
    if(locate('idgate',id_pai,[])) then begin
        tipo:=fieldbyname('tipo').asString;
        if (tipo='AND') then begin
            total:=1;
            for i:=1 to num_evento-1 do
                total:=total*evento[i];
            for j:=1 to num_topo-1 do
                total:=total*valor_topo[j];
            end
        else begin
            total:=0;
            for i:=1 to num_evento-1 do
                total:=total+evento[i];
            for j:=1 to num_topo-1 do
                total:=total+valor_topo[j];
            end;
            result:=total;
        end;
    end;
end;
end;

```

Definido esta primeira fase, inicia-se então a fase dois onde algumas modificações serão feitas neste algoritmo, para refletir o cálculo da parte Fuzzy. Inicialmente, será apresentada a rotina de transformação das probabilidades pontuais

dos eventos básicos. Tal rotina modifica os valores probabilísticos transformando-os para uma representação numérica fuzzy, e para tal, faz uso de uma função de pertinência triangular. Isto pode ser visto na rotina apresentada na listagem 5.4:

Listagem 5.4 - transformação de valores probabilísticos para representação fuzzy.

```

procedure TfrmFTA1.ConversaoDeBEventsParaFuzzyNumbers;
var
  i, k: integer;

begin
  with frmFTA1.tblEventNo do begin
    first;
    for i:= 1 to frmFTA1.tblEventNo.RecordCount do begin
      Prob[i,1,1] := fieldbyname('LowerBound').Asfloat;
      Prob[i,2,1] := fieldbyname('UpperBound').Asfloat;
    next;
  end;
end;
with frmFTA1.tblEventNo do
begin
  first;
  for i := 1 to tblEventNo.RecordCount do begin
    with frmFTA1.tblFuzzyTop do begin
      first;
      for k:=1 to tblFuzzyTop.RecordCount do
        begin
          Prob[i,1,k] := Prob[i,1,1] + (tblFuzzyTop.fieldbyname('Alfa-Level').asfloat *
            ((tblEventNo.fieldbyname('Probabilistic').Asfloat) - Prob[i,1,1]));
          Prob[i,2,k] := Prob[i,2,1] - (tblFuzzyTop.fieldbyname('Alfa-Level').asfloat * (Prob[i,2,1] -
            (tblEventNo.fieldbyname('Probabilistic').Asfloat)));
        next;
      end;
    end;
  end;
end;
end;
end;

```

Primeiramente, esta rotina lê apenas os valores exibidos na tabela tblEventNo para “LowerBound” e “UpperBound”. Estes valores foram calculados utilizando o conceito de campo calculado para tabelas, existente no Delphi. À partir das probabilidades pontuais, e dos valores de fatores de erro, definidos como dados de entrada, calcula-se então as probabilidades fuzzy “lowerbound” e “upperbound”, e a partir destes valores e utilizando a função de pertinência calcula-se as demais

probabilidades fuzzy para cada valor de “alfalevel”, definido na tabela tblFuzzyTop, e para cada “lowerbound” e “upperbound”.

É importante ressaltar que, outra função de pertinência pode ser utilizada futuramente neste ponto, refletindo requisitos de experiência de um especialista de área. Basta apenas que o programador com algum conhecimento na área procure junto ao especialista de área definir valores que permitem elaborar uma função de pertinência, utilizando para isso apenas conceitos fuzzy.

Em seguida, define-se uma rotina principal associada ao evento “OnClick” de um componente do tipo “Button” definido no formulário frmFTA1. Repare que esta rotina faz a chamada do procedimento de transformação de eventos basicos e lê cada portão (“gate”) na tabela tblGates repassando-o como argumento à nova função de cálculo de topo fuzzy, para então retornar o valor topo, e em seguida editar os resultados na tabela tblFuzzyTop.

Listagem 5.5 - cálculo da probabilidade do evento topo fuzzy no caso da árvore completa.

```
procedure TfrmFTA1.btnFuzzyTopFullClick(Sender: TObject);
var
  id_gate, k, j: integer;
  valor_topo: Tvetor;
  valor_producao: Tvetor;
begin
  btnFUIM.enabled:=true;
  ConversaoDeBEventsParaFuzzyNumbers;
  for k:= 1 to 11 do
    for j:=1 to 2 do
      valor_topo[j,k]:=0;
    with tblgates do begin
      id_gate:=fieldname('idgate').asInteger;
      calcula_topofuzzy(id_gate, valor_topo);
      tblFuzzyTop.first;
      k:=1;
      with tblFuzzyTop do begin
        while not eof do begin
          tblFuzzyTop.edit;
          fieldbyname('Lower Bound').asfloat := valor_topo[1,k];
          fieldbyname('Upper Bound').asfloat := valor_topo[2,k];
          next;
          inc(k);
        end;
      end;
    end;
  end;
```

```

end;
end;
end;
end;

```

Pode-se então passar a nova função, a de cálculo do evento topo fuzzy, onde modificações foram feitas para refletir a representação da lógica fuzzy. A diferença principal comparada com a rotina básica, pode ser vista nas linhas de código a seguir. Em lugar do valor probabilístico pontual, foi lido o novo valor da probabilidade fuzzy, determinado no procedimento descrito anteriormente. Após ter lido o evento básico ligado a um “gate” pai na tabela tblGatesBEvents o valor da probabilidade, **Prob**, é passado ao evento do nível na árvore de falhas. Não foi apresentada toda a rotina de cálculo fuzzy, apenas as modificações ocorridas.

Listagem 5.6 - Modificação para refletir o caso de cálculo fuzzy com árvore completa.

```

ev:=fieldbyname('idbevent').asInteger;
for k:= 1 to 11 do begin
  for j:=1 to 2 do
    evento[num_evento,j,k]:=Prob[ev,j,k];
  end;
end;

```

Para o cálculo fuzzy, o processo de soma na ocorrência de “gate” OR, difere do cálculo tradicional probabilístico. Foi então elaborado um procedimento que pudesse determinar o produtório dos eventos básicos, pois a soma fuzzy utiliza o conceito de produtório, durante a operação de soma entre eventos básicos. Para este procedimento foi passado como argumento o número do evento, o evento e retorna o valor do produtório. Esta descrição pode ser vista na listagem 5.7:

Listagem 5.7 - Procedimento que auxilia o cálculo da soma de números fuzzy.

```

procedure Produtorio(num_evento:integer; evento: TProb : var valor_produtorio: Tprodutorio);
var
  i,j,k:integer;

```



```

begin
  for j:=1 to 2 do
    for k:=1 to 11 do
      valor_producao[j,k] :=1;
    for j:=1 to 2 do
      for k:=1 to 11 do
        for i:=1 to num_evento-1 do
          valor_producao[j,k] := valor_producao[j,k] *(1 - evento[i,j,k]);
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

A partir deste ponto tem início o cálculo das medidas de importância. Será descrito primeiramente, o processo de cálculo da medida FIM (“fuzzy importance measure”) e seu processo de ordenamento crescente (FIMrank), e depois o valor de FUIM (“fuzzy uncertainty importance measure”) e seu ordenamento (FUIMrank).

Para o cálculo de FIM, primeiro reinicializa-se os valores das probabilidades fuzzy. Utilizando o algoritmo de cálculo fuzzy com algumas modificações, será determinado o topo fuzzy trocando-se os valores das probabilidades do primeiro evento básico apenas para **hum** e depois fazendo o mesmo procedimento com o valor **zero**. Este conceito, é empregado no sentido de se adotar o componente completamente indisponível para o sistema como um todo, se o valor é hum, e totalmente disponível para o valor zero. Feito isto, utiliza-se este mesmo processo para cada componente, até que todos os eventos básicos sejam analisados. A rotina de cálculo topo fuzzy é comum para o caso de FIM e FUIM.

Após todo este procedimento, inicia-se então, o cálculo da distância Euclideana para cada evento básico, considerando inicialmente o topo fuzzy calculado com valor hum e com valor zero para a probabilidade. É importante ressaltar que, o valor topo para o caso fuzzy é representado por uma função também triangular, onde o eixo vertical é composto com os valores de “AlfaLevel” e o eixo horizontal é o universo de discurso da função de pertinência, caracterizado pelas probabilidades. A função definida para calcular esta distância, tem como argumentos “lowerum”, “lowerzero”, “upperum”, “upperzero” e o número do evento, e retorna o valor de FIM para cada componente.

E por último, outra função foi definida para ordenar de forma crescente estes valores de FIM. São passados como argumento, para este caso, os valores de FIM e o número do componente, retornando a lista ordenada rank_FIM.

Em seguida estes valores, de FIM e rank_FIM, são editados na tabela tblEventNo do formulário.

Todo este processo é descrito em um procedimento associado à um evento "OnClick" de um componente Tbutton localizado no formulário frmFTA1, e descrito na listagem 5.8:

Listagem 5.8 - Rotina principal para cálculo de FIM no caso completo.

```

procedure TfrmFTA1.btnFIMClick(Sender: TObject);
var
  id_gate, num_ev: integer;
  Lowerzero, Upperzero, Lowerum, Upperum: Tnum;
  valor_topo: Tvetor;
  valor_FIM: Tvalor;
  i, k, j: integer;
  rank_FIM: Tordem;
  posfim: TBookMark;

begin
  ConversaoDeBEventsParaFuzzyNumbers;
  BOTAO:=false;
  for k:= 1 to 11 do
    for j:=1 to 2 do
      valor_topo[j,k]:=0;
    calcular o topo Hum e Zero para cada AlfaLevel
  begin
    for i:=0 to 1 do begin
      if (i=0) then
        zeroum:=false
      else
        zeroum:=true;
      with tblEventNo do begin
        tblEventNo.first;
        tblgates.first;
        while not tblEventNo.eof do begin
          num_ev:=fieldbyname('idbevent').asInteger;
          posfim:=getbookmark;
          with tblgates do begin
            id_gate:=fieldbyname('idgate').asInteger;
            ConversaoDeBEventsParaFuzzyNumbers;
            calcula_topoFuzzyNew(id_gate, num_ev, valor_topo);
            for k:=1 to 11 do begin

```

```

        if (i=0) then begin
            Lowerzero[num_ev,k]:= valor_topo[1,k];
            Upperzero[num_ev,k]:= valor_topo[2,k];
        end
        else begin
            Lowerum[num_ev,k]:= valor_topo[1,k];
            Upperum[num_ev,k]:= valor_topo[2,k];
        end;
    end;
    gotoBookMark(posfim);
    next;
    FreeBookMark(posfim);
    inc(num_ev);
end;
end;
end;
with tblEventNo do begin
    first;
    while not eof do begin
        num_ev:=fieldbyname('idbevent').asInteger;
        calcula_distanciaEuclideana(Lowerum, LowerZero, Upperum, UpperZero, num_ev, valor_FIM);
        next;
        inc(num_ev);
    end;
end;
calcula_rankFIM(valor_FIM, num_ev, rank_FIM);
begin
    tblEventNo.first;
    i:=1;
    with tblEventNo do begin
        while not eof do begin
            tblEventNo.edit;
            fieldbyname('FIM').Asfloat := valor_FIM[i];
            fieldbyname('FIMrank').Asinteger := rank_FIM[i]; //rank_fim
            next;
            inc(i);
        end;
    end;
end;
end;
end;

```

A grande modificação na rotina básica de cálculo do topo fuzzy, reside no processo de atribuição do valor da probabilidade no caso de FIM, em cada evento básico, para os valores de um e de zero, e no caso de FUIM, também para cada evento básico, o valor de Fatores de Erro de cada evento básico igual à **um**. O que significa

dizer em outras palavras que, se utiliza o próprio valor probabilístico da probabilidade pontual para cada evento básico e determina-se o evento topo dessa maneira para o cálculo de FUIM. As linhas de código onde estas modificações podem ser vistas são apresentadas na listagem 5.9:

Listagem 5.9 - modificações para o cálculo de FIM e de FUIM para árvore completa.

```
with frmFTa1.tblGatesBEvents do begin
  num_evento:=1;
  frmFTa1.tblGatesBEvents.first;
  while not frmFTa1.tblGatesBEvents.eof do begin
    ev:=frmFTa1.tblGatesBEvents.fieldbyname('idgate').asInteger;
    if(ev=id_pai) then begin
      ev:=frmFTa1.tblGatesBEvents.fieldbyname('idbevent').asInteger;
      for k:= 1 to 11 do begin
        for j:=1 to 2 do begin
          if (num_ev=ev) then
            if (BOTAO) then begin
              if (doistres) then begin
                with frmFTa1.tblEventNo do
                  evento[num_evento,j,k]:=frmFTa1.tblEventNoProbabilistic.Asfloat;
                end
              else
                evento[num_evento,j,k]:=Prob[ev,j,k];
              end
            else begin
              if (zeroum) then
                evento[num_evento,j,k]:=1 // BEvent i indisponivel
              else
                evento[num_evento,j,k]:=0 // BEvent i disponível
              end
            else
              evento[num_evento,j,k]:=Prob[ev,j,k]; // falha dos BEvent's
            end;
          end;
        end;
      end;
      inc(num_evento);
    end;
    frmFTa1.tblGatesBEvents.next;
  end;
end;
```

A utilização da variável **BOTAO** é para criar um mecanismo de dependência para o cálculo de FUIM, onde os valores de evento topo fuzzy devem ser determinados primeiros, pois serão utilizados no cálculo de FUIM, quando for determinada a distância Euclideana. A variável **doistres** é um “flag” para rotina de cálculo de FUIM e

zeroum um “flag” para cálculo de FIM no caso de indisponibilidade e disponibilidade do componente.

A rotina de distância Euclideana usa a expressão clássica de distância entre dois pontos, é pequena e simples e pode ser vista na listagem 5.10:

Listagem 5.10 - determinação da distância entre dois pontos.

```
procedure calcula_distanciaEuclideana(Lowerum, Lowerzero, Upperum,Upperzero: Tnum; i:integer;
var valor: Tvalor);
var
  k: integer;
  temp:real;
begin
  temp:=0.0;
  for k:=1 to 11 do begin
    temp := temp + sqrt(sqr(lowerum[i,k]-lowerzero[i,k]) + sqr(upperum[i,k]-upperzero[i,k]));
  end;
  valor[i]:= temp;
end;
```

Para o processo de ordenamento, existe o processo clássico de ordenação e depois o de colocar o vetor em ordem do maior para o menor valor. Isto pode ser visto no procedimento calcula_rankFIM apresentado na listagem 5.11:

Listagem 5.11 - ordena os valores de FIM e de FUIM em ordem decrescente.

```
begin
  num_ev:=num_ev-1;
  // copio valor em valor1
  for i:=1 to num_ev do
    valor1[i]:=valor[i];
  //ordeno valor1
  for i:=1 to num_ev-1 do
    for j:= i+1 to num_ev do begin
      if (valor[i]<valor[j]) then begin
        temp:=valor[j];
        valor[j]:=valor[i];
        valor[i]:=temp;
      end;
    end;
  //estabeleco o rank
  for j:=1 to num_ev do
    for i:= 1 to num_ev do begin
      if (valor[i]=valor1[j]) then
        rank_FIM[j]:=i;
```

```
end;  
end;
```

O próximo passo é a descrição de FUIM, que utiliza uma rotina principal e chama o procedimento de cálculo topo fuzzy, já descrito anteriormente, seguido do cálculo da distância Euclideana e no final o cálculo da ordenação, de forma semelhante ao caso FIM. As diferenças podem ser vistas na rotina de cálculo de topo fuzzy apresentada na listagem 5.11. Não será necessário apresentar as linhas de código pois em pouco modifica se comparadas ao processo anterior de cálculo de FIM.

5.1.2 - Tratamento da Árvore de Falhas com Cortes Mínimos

Os algoritmos desenvolvidos e os cálculos feitos anteriormente, para o caso da árvore completa, foram de grande valia para o estudo e desenvolvimento dos novos algoritmos para o caso do tratamento da árvore de falhas com cortes mínimos.

Novos procedimentos foram desenvolvidos no sentido de reduzir a árvore de falhas atendendo basicamente à álgebra Booleana quanto a “**Idempotence**” e **Absorção**. Para estes dois requisitos foram desenvolvidos procedimentos que permitissem primeiro expandir a árvore e depois reduzi-la.

De forma semelhante existe no formulário frmFTA1, componentes do tipo “Button”, para estabelecer através de eventos “OnClick” os cálculos de eventos topo probabilístico com cortes mínimos (i) **TopMCS**, o cálculo do evento topo fuzzy (ii) **FuzzyMCS**, o cálculo de (iii) **FIMmcs**, o cálculo de seu ordenamento (iv) **FIMrankmcs**, o cálculo de (v) **FUIMmcs** e finalmente (vi) **FUIMrankmcs**.

A primeira rotina de cálculo é a do evento topo probabilístico com cortes mínimos. Esta rotina inicialmente lê o “gate” na tabela tblGates e passa como argumento para a função de nome **calcula_expressão_topo**. Internamente a esta função, árvore é expandida em cada topo, em forma de “string”, em seguida, esta “string” é passada a função **aplicar_idempotence**, que retorna uma string topo, sem elementos repetidos, para em seguida ser passada para a função **aplicar_absorcao** que

retorna a expressão final de soma de produtos, conhecida como expressão dos cortes mínimos. A expressão final então é passada para uma função que faz a operação com os cortes mínimos, a qual retorna apenas um valor probabilístico. A rotina principal e as demais rotinas descrevendo estas etapas são apresentadas na listagem 5.12:

Listagem 5.12 - rotina principal de cálculo do evento topo probabilístico para árvore de falhas com cortes mínimos (MCS).

```
procedure TfrmFTA1.btnTopMCSClick(Sender: TObject);
var
  id_gate : integer;
  valor_topo : string;
  valor_topoEnd: real;
begin
  with tblgates do begin
    id_gate:=fieldbyname('idgate').asInteger;
    //CALCULA VALOR_TOPO COM "CUT SETS" (CS)
    valor_topo := calcula_expressao_topo(id_gate);
    // Edita o resultado
    valor_topoEnd := aplicar_Soma(valor_topo);
    editProbabilisticTopEventMCS.text := floattostrF(valor_topoEnd,ffExponent,3,6);
  end;
end;
```

A primeira função que permite calcular o evento topo probabilístico é apresentada a seguir. A grande alteração nesta rotina se comparada ao caso da análise de árvore de falhas completa, foi o tratamento dado ao evento básico como “string” e operar todos os componentes através dos “gates”, de baixo para cima na árvore, como uma “string”, e operando apenas “strings” até o evento topo final. Apenas as linhas modificadas são apresentadas e podem ser vistas na listagem 5.13:

Listagem 5.13 - linha modificada para refletir *string* associada à evento.

```
//concatena em forma de strings os eventos
eventos:=eventos+InttoStr(frmFTA1.tblbevent.fieldbyname('IDBEvent').asInteger)+ " ";
```

```
end;
```

Outro ponto importante desenvolvido durante o processo de determinação do evento topo interno à este procedimento, foi a criação de uma função distributiva para realizar a fase de expansão da “string” após a passagem pelos gates. As linhas descrevendo esta etapa são vistas na listagem 5.14:

Listagem 5.14 - mais algumas modificações na rotina de cálculo de evento topo com cortes mínimos.

```
function calcula_expressao_topo(id_pai:integer):string;
var
  i, j, k, num_topo, no, ev, num_evento:integer;
  eventos, total: string;
  valor_topo :array[1..100000] of string;
  id_gate, a, nt1, nt2, ne, posfinal:integer;
  tipo:string;
  pos:TBookMark;
  termos1, termos2:Ttermos;
  t,t1:string;

begin
  with frmFTA1.tblGatesGates do begin
    num_topo:=1;
    first;
    while not eof do begin
      a:=id_pai;
      no:=fieldbyname('idpai').asInteger;
      pos:=GetBookMark;
      if(no=a) then begin
        id_gate:=fieldbyname('idfilho').asInteger;
        valor_topo[num_topo]:=calcula_expressao_topo(id_gate);
        inc(num_topo);
      end;
      gotobookmark(pos);
    next;
    freebookmark(pos);
  end;
  with frmFTA1.tblGatesBEvents do begin
    eventos:="";
    first;
    while not eof do begin
      ev:=fieldbyname('idgate').asInteger;
      if(ev=id_pai) then begin
```



```

    ev:=fieldbyname('idbevent').asInteger;
    frmFta1.tblbevent.locate('idbevent'.ev,[]);
    //concatena em forma de strings os eventos
    eventos:=eventos+InttoStr(frmFTA1.tblbevent.fieldbyname('IDBEvent').asInteger)+' ';
end;
next;
end;
end;
with frmFTA1.tblgates do begin
    if(locate('idgate',id_pai,[])) then begin
        tipo:=fieldbyname('tipo').asString;
        if (tipo='AND') then begin
            total:="";
            for i:=1 to length(eventos) do begin
                if(eventos[i]<>' ') then
                    total:=total+eventos[i];
                if (i=length(eventos)) then begin
                    if (num_topo-1<>0) then
                        if (i<>length(eventos)) then
                            total:=total+'*'; //para so eventos
                        break;
                    end;
                total:=total;
                if (eventos[i]=' ') then
                    total:=total+'*';
            end;
            if (total="") then
                t:=total
            else
                t:=total+'*';
            if (num_topo-1=0) then
                t1:=t
            else
                t1:="";
            for j:=1 to num_topo-1 do begin
                termos1:=distrib(valor_topo[j], nt1);
                termos2:=distrib(t, nt2);
                for i:=1 to nt1 do begin
                    if (nt2=0) then begin
                        for k:=1 to nt1 do begin
                            t:=t+termos1[k]+'+';
                        end;
                        break;
                    end
                else begin
                    for k:=1 to nt2 do begin
                        t1:=t1+termos1[i]+termos2[k]; //modificado em 18.08
                        t1:=t1+'+';
                    end;
                end;
            end;
            total:=t1;
        end
    end
end

```

```

else begin
  total:="";
  for i:=1 to length(eventos) do begin
    if(eventos[i]<>' ') then
      total:=total+eventos[i];
      if (i=length(eventos)) then begin
        total:=total+'*+';
        break;
      end;
      total:=total;
      if (eventos[i]=' ') then
        total:=total+'*+';
      end;
      for j:=1 to num_topo-1 do
        total:=total+valor_topo[j];
      end;
      // Aplica Idempotence por topo
      total:= aplicar_idempotence(total);
      // Aplicar Absorcao por topo - "MINIMAL CUT SET" (MCS)
      total:= aplicar_absorcao(total);
      // Edita o resultado
      result:=total;
    end;
  end;
end;

```

Na listagem 5.15 foi apresentada a função distributiva para fazer a expansão dos portões (“gates”). Retorna outra “string”, até o cálculo do evento topo final, onde a string resultante é determinada, contendo todas as operações de todos os portões (“gates”).

Listagem 5.15 - Declara a rotina distributiva para operar cada gate em cada nível da árvore.

```

function distrib(valor:string; var nt:integer):Ttermos;
var
  v:Ttermos;
  j,posini,posfinal:integer;
begin
  nt:=0;
  posini:= 1;
  j:= 1;
  while Pos('+', valor) > 0 do begin
    posfinal := pos ('+', valor);
    if ( posfinal <> 0 ) then begin
      inc(nt);
      v[j]:=copy(valor,posini,posfinal-posini);
      valor[ pos('+', valor) ] := 's';
      posini := posfinal + 1;
    end;
  end;

```

```

    inc(j);
end;
end;
result:=v;
end;

```

A primeira simplificação de eliminação dos eventos repetidos (**“idempotence”**) pode ser vista na listagem 5.16. Esta rotina, utiliza uma função do Delphi, denominada de pos, que localiza “strings” s menores em uma “string” maior S.

Listagem 5.16 - Elimina os eventos repetidos na “string” do evento topo.

```

function aplicar_idempotence(valor_topo: string): string;
var
  i,j,posini, posfinal: integer;
  num:array[1..30] of integer;
  t2:string;
  t:integer;
  elem:array[1..10000] of integer;
  p1, p2, ne:integer;
  inserir:boolean;
begin
  posini:=1;
  j:= 1;
  p1:=1;
  for i:=1 to 100 do
    elem[i]:=0;
  while Pos('+', valor_topo) > 0 do begin
    ne:=0;
    posfinal := pos ('+', valor_topo);
    p2 := pos ('*', valor_topo);
    if (p2<>0) then
      ne:=1;
    while Pos('*', valor_topo) > 0 do begin
      inserir:=true;
      t:=strtoint(copy(valor_topo, p1,p2-p1));
      for i:=1 to ne do begin
        if (t=elem[i]) then begin
          inserir:=false;
          break;
        end;
      end;
      if (inserir) then begin
        elem[ne]:=t;
        inc(ne);
      end;
      valor_topo[pos('*',valor_topo)]:='m';
      p1:=p2+1;
      p2 := pos ('*', valor_topo);
    end;
  end;

```

```

        if (p2> posfinal) then
            break;
        end;
    for i:=1 to ne-1 do
        t2:=t2+inttostr(elem[i])+'*';
    t2:=t2+'+';
    p1:=posfinal+1;
    valor_topo[pos('+',valor_topo)]:=s';
    for i:=1 to 100 do
        elem[i]:=0;
    end;
    result:=t2;
end:

```

Após a eliminação dos eventos repetidos em cada corte mínimo, aplica-se a função de absorção para eliminar os cortes não mínimos. Algumas etapas internas a este procedimento foram desenvolvidas através de novas chamadas de procedimentos, no sentido de se eliminar todas as combinações possíveis em que os eventos básicos aparecem em cada corte não mínimo. Primeiro, o procedimento separa a string valor_topo em elementos, fornecendo assim o número de cortes. Em seguida, ordena-se os elementos, para posicionar os cortes em ordem. Terceiro, ordena-se em cada corte os eventos básicos que aparecem nos cortes. Desta forma, fica mais fácil o processo de eliminação de elementos repetidos contidos e de eventos repetidos contidos em elementos e que podem ser identificados para eliminação do seu elemento de posicionamento. Esta rotina é grande mas elimina toda e qualquer possibilidade de eventos escondidos em elementos. O retorno desta rotina são os cortes mínimos. Na listagem 5.17 estas implementações podem ser observadas.

Listagem 5.17 - Remove todos os cortes não mínimos.

```

function aplicar_absorcao(valor_topo: string):string;
var
    abs : boolean;
    i, j, k, posini, posfinal, num_elem, p: integer;
    elem, elem1, elem2: Ttermos;
    numev, numevf: integer;
    elemstring, elemstring1, elemstringf: string;
    posiniz, posinizz, posfinalz, posfinalzz, num_elemz, num_elemzz: integer;

```

```

elemz, elemzz: Ttermos;
posinif, posfinalf, num_elemf: integer;
elemf: array[1..10000,1..10] of string;
ii, jj: integer;
pf, count, countzero: integer;
lelemzz: integer;
a, b: integer;
c, d: string;
begin
//1. desmembra a string valor_topo em elem : numero de cut sets
k := 0;
num_elem := 1;
posini := 1;
while pos('+', valor_topo) > 0 do begin
  posfinal := pos('+', valor_topo);
  if (posfinal = pos('+', valor_topo)) then begin
    for i:= posini to posfinal-1 do begin
      elem[num_elem] := copy(valor_topo, posini, posfinal-posini);
      end;
      inc(num_elem);
    end;
    valor_topo[pos('+', valor_topo)] := 's';
    posini := posfinal + 1;
  end;
//2. Ordenar cada elem[num_elem]- string (ordena os de ordem 2 em diante)
for i:=1 to num_elem-1 do begin
  numev:=length(elem[i]);
  ordena1(elem[i],i,numev,elemstring1);
  elem1[i] := elemstring1;
end;
//3. Ordenar todos os elem's - STRING(primeira ordem= uma string no elem,...)
ordena(elem1, num_elem, elem2);
// Na STRING - armazena se: (a) i está em j; (b) i = j(i+n); (c) i<>j
// Na string - também se todas "string's" de um elemento qq estiver contida
// em outro elemento 'maior', em posições diferentes da original e após
// ordenação.
valor_topo:="";
abs := false;
num_elemf:=0;
posinif:=1;
for i:=1 to num_elem-1 do begin

  while pos('*', elem2[i]) > 0 do begin
    posfinalf:= pos('*', elem2[i]);
    if (posfinalf>0) then begin
      inc(num_elemf);
      elemf[i,num_elemf] :=copy(elem2[i], posinif, posfinalf-posinif);
    end;
    elem2[i][pos('*', elem2[i])] := 'm';
    posinif := posfinalf + 1;
  end;
  posinif:=1;
  num_elemf:=0;
end;
end;

```

```

for i := 1 to num_elem-2 do begin
  count:=0;
  for j := i+1 to num_elem-1 do begin
    count:=0;
    //caso a string esteja contida em outra, a "outra" nao e' armazenada
    for ii:=1 to length(elem2[i])div 2 do begin
      for jj:=1 to length(elem2[j])div 2 do begin
        c:=elemf[i,ii];
        d:=elemf[j,jj];
        if (elemf[i,ii] = elemf[j,jj])then begin
          inc(count);
          break;
        end;
      end;
    end;
    a:=length(elem2[i])div 2;
    b:=length(elem2[j])div 2;
    if (count=length(elem2[i])div 2) then begin
      elem2[j]:='0';
      count:=0;
      break;
    end;
  end;
end;

//eliminar os zeros de elem2
valor_topo:="";
for i:= 1 to num_elem-1 do begin
  if (elem2[i] <>'0') then begin
    if (i<>num_elem) then
      valor_topo := valor_topo + elem2[i]+ '+'
    else
      valor_topo := valor_topo + elem2[i];
  end;
end;
while pos('m', valor_topo) > 0 do begin
  valor_topo[pos('m', valor_topo)]:='*';
end;
// THE END
result := valor_topo;// retorna o Minimal Cut Sets (MCS)

end;

```

São apresentadas nas listagens 5.18 e 5.19, as duas rotinas de ordenação de “string” e de elementos em “string”. Inicialmente, é feita uma transformação em cada uma para se trabalhar com inteiros e no final da ordenação esta lista é retornada à uma string para ser devolvida a rotina de absorção descrita anteriormente.

Listagem 5.18 - Ordena a “string” topo.

```

procedure ordena(valor: Ttermos; num_ev: integer; var valor2: Ttermos);
var
  i,j, temp1: integer;
  temp:string;
  valor1:Tordem;
  tam:array[1..100000] of integer;
begin
  for i:=1 to num_ev-1 do begin
    tam[i]:=length(valor[i]);
  end;
  for i:=1 to num_ev-2 do
    for j:= i+1 to num_ev-1 do begin
      if (tam[i]>tam[j]) then begin
        temp1:=tam[j];
        tam[j]:=tam[i];
        tam[i]:=temp1;
        temp:=valor[j];
        valor[j]:=valor[i];
        valor[i]:=temp;
      end;
    end;
  end;
  for i:=1 to num_ev-1 do
    valor2[i]:=valor[i];
  end;
end;

```

Listagem 5.19 - ordena cada “string” em cada elemento da “string” do evento topo.

```

procedure ordena1(valor: string; knum_ev :integer; numev: integer; var valor2: string);
var
  i,j,k,temp, num_elem: integer;
  valor1:Tordem;
  valor11, tempstring: string;
  posini, posfinal:integer;
begin
  posini:=1;
  for i:=1 to 50 do
    valor1[i]:=0 ;
    num_elem:=1;
    if (numev-1>1) then begin
      while pos('*',valor)>0 do begin
        posfinal:=pos('*',valor);
        valor1[num_elem]:=StrToInt(copy(valor,posini,posfinal-posini));
        posini:=posfinal+1;
        valor[pos('*',valor)]:='m';
        inc(num_elem);
      end;
    end;
    ordena
  end;
end;

```

```

for i:=1 to num_elem-2 do
  for j:= i+1 to num_elem-1 do begin
    if (valor1[i]>valor1[j]) then begin
      temp:=valor1[j];
      valor1[j]:=valor1[i];
      valor1[i]:=temp;
    end;
  end;
  tempstring:="";
  for i:= 1 to num_elem-1 do
    tempstring:= tempstring + InttoStr(valor1[i])+'*';
    valor2:= tempstring;
  end
  else
    valor2:=valor;
end;

```

A função que opera a expressão final com os cortes mínimos, apenas lê os valores de probabilidades de cada evento básico presente nos cortes mínimos e substituindo-os, para fazer a operação de soma de produtos. Isto pode ser verificado na listagem 5.20:

Listagem 5.20 - Realiza operação de soma para o evento topo probabilístico.

```

function aplicar_Soma(valor_topo: string): real;
var
  i,p2,p1: integer;
  prob,temp,vp, valor_topoEnd:real;
  posfinal,posini,num_elem:integer;
  ev:array[1..10000] of integer;
begin
  valor_topoEnd:=0;
  vp:=0;
  posini:=1;
  num_elem:=1;
  p1:=1;
  while Pos('+', valor_topo) > 0 do begin //IDCutSet
    temp:=vp; //probabilidade de cada MCS
    vp:=1;
    valor_topoEnd:=valor_topoEnd+temp; //soma de todos MCS
    while pos('*',valor_topo)>0 do begin
      posfinal:= pos('+', valor_topo);
      p2:=pos('*', valor_topo);
      ev[num_elem]:=StrToInt(copy(valor_topo,p1,p2-p1));
      valor_topo[pos('*',valor_topo)]:='m';
      frmfta1.tbIBEvent.locate('IdBEvent',ev[num_elem],[]);
      prob:=frmfta1.tbIBEvent.fieldbyname('probabilistic').asFloat;
      vp:=vp*prob;
    end;
  end;

```



```

inc(num_elem);
p1:=p2+1;
p2:=pos('*', valor_topo);
if (p2>posfinal) then
  break;
end;
p1:=posfinal+1;
valor_topo[pos('+', valor_topo)]:= 's';
end;
result:=valor_topoEnd;
end;

```

Encerra-se assim, a fase de cálculo de evento topo probabilístico utilizando o conceito de cortes mínimos aplicado à árvore de falhas. A seguir, é apresentada a descrição dos algoritmos de cálculo de evento topo fuzzy com cortes mínimos.

Basicamente o que modifica no procedimento principal associado ao evento “OnClick” do componente “Tbutton”, para cálculo do evento topo, é a nova função definida para operar o valor_topo final com os cortes mínimos, considerando números fuzzy. A rotina de soma anteriormente definida serviu de base para desenvolver esta nova rotina e com pequenas mudanças obtém-se a nova função de cálculo denominada de **aplicar_SomaFuzzy**. Esta rotina lê os valores de probabilidade transformados para representação fuzzy, dos eventos básicos e da mesma forma utiliza o conceito de **produtório**, pois opera números fuzzy.

Depois de calculado o resultado da probabilidade fuzzy, este valor é editado na tabela tblFuzzyTop do formulário frmFTA1. A rotina de soma fuzzy é apresentada na listagem 5.21:

Listagem 5.21 - realiza a operação de soma com números fuzzy.

```

function aplicar_SomaFuzzy(valor_topo:string): Tvetor;
var
  i,j,k, num_cutset: integer;
  num_elem,posfinal,p1,p2: integer;
  valor_produto: Tprodutorio;
  valor_topoEnd: Tvetor;
  ev: array[1..100000] of integer;
  vp:TProb;
  a:double;
begin

```

```

// substituir os valores de BEvent's Fuzzy na expressao de Topo
for j:=1 to 2 do
  for k:=1 to 11 do
    for i:=1 to 500 do
      vp[i,j,k]:=1;
    num_cutset:=1;
    num_elem:=0;
    p1:=1;

    while Pos('+', valor_Topo)>0 do begin
      posfinal:=pos('+', valor_topo);
      while Pos('*', valor_topo)>0 do begin
        p2:=pos('*', valor_topo);
        inc(num_elem);
        ev[num_elem]:= StrToInt(copy(valor_topo,p1, p2-p1));
        valor_topo[pos('*',valor_topo)]:='m';
        p1:=p2+1;
        p2:=pos('*', valor_topo);
        if (p2>posfinal) then begin
          inc(num_cutset);
          break;
        end;
      end;
    end;
  end;
  for i:=1 to num_elem do begin
    for j:=1 to 2 do begin
      for k:=1 to 11 do begin
        vp[num_cutset-1,j,k]:=vp[num_cutset-1,j,k]*prob[ev[i],j,k];
        a:=prob[ev[i],j,k];
      end;
    end;
  end;
  Produtorio(num_cutset,vp,valor_produtorio);
  num_elem:=0;
  p1:=posfinal+1;
  valor_topo[pos('+', valor_topo)]:='s';
end;

```

Quanto a parte de cálculo de FIM, FIMrankmcs, FUIMmcs e FUIMrankmcs, a modificação é realizada na nova função de cálculo da soma de valores fuzzy denominada de **aplicar_SomaFuzzyNew**, pois a mesma terá de levar em conta os valores de topo para eventos básicos com indisponibilidades e disponibilidades no caso de FIM e de Fatores de Erro igual à hum, no caso de FUIM. As demais considerações se repetem aqui, quanto à distância Euclideana e rotina de ordenação. A rotina de soma é apresentada na listagem 5.22, com suas modificações se comparada ao caso anterior.

Listagem 5.22 - Realiza a operação de soma para o caso de FIM e de FUIM.

```
function aplicar_SomaFuzzyNew(valor_topo: string; num_ev: integer): Tvetor;
var
  i,j,k, num_cutset: integer;
  p1,p2,posini,posfinal,num_elem: integer;
  valor_producao: Tprodutorio;
  valor_topoEnd: Tvetor;
  vp:TProb;
  ev: array[1..500] of integer;
begin
  // aplicar o conceito de 1 e 0 para cada BEvent e usar a mesma
  // rotina para cálculo de FUIM com EF=1.
  for j:=1 to 2 do
    for k:=1 to 11 do
      for i:=1 to 50 do
        vp[i,j,k]:=1;
      num_cutset:=1;
      num_elem:=0;
      posini:=1;
      p1:=1;
      with frmFTA1.tblEventNo do begin
        first;
        for i:= 1 to frmFTA1.tblEventNo.RecordCount do begin
          Probabilistic[i] := fieldbyname('Probabilistic').Asfloat;
        next;
      end;
    end;
  end;

  while Pos('+', valor_topo)>0 do begin
    posfinal:=pos('+', valor_topo);
    while Pos('*', valor_topo)>0 do begin
      p2:=pos('*', valor_topo);
      inc(num_elem);
      ev[num_elem]:= StrToInt(copy(valor_topo,p1, p2-p1));
      valor_topo[pos('*',valor_topo)]:='m';
      p1:=p2+1;
      p2:=pos('*', valor_topo);
      if (p2>posfinal) then begin
        inc(num_cutset);
        break;
      end;
    end; // *
  //.....

  for i:=1 to num_elem do begin
    if(num_ev=ev[i]) then begin
      for k:= 1 to 11 do begin
        for j:=1 to 2 do begin
          if (not BOTAO) then begin
            if(zeroum) then //true
              prob[ev[num_elem],j,k]:=1 //BEvent i indisponivel
            else
```

```

        prob[ev[num_elem],j,k]:=0;    //BEvent i totalmente disponivel
    end //if
    else begin
        if (doistres) then
            prob[ev[num_elem],j,k]:=probabilistic[ev[num_elem]];
        end;
        vp[num_cutset-1,j,k]:=vp[num_cutset-1,j,k]*prob[ev[i],j,k];
    end; //for j
end; // for k
end //if
else begin
    for k:= 1 to 11 do
        for j:=1 to 2 do
            vp[num_cutset-1,j,k]:=vp[num_cutset-1,j,k]*prob[ev[i],j,k];
        end; //else
    end; //for
    Produtorio(num_cutset,vp,valor_produtorio);
    num_elem:=0;
    pl:=posfinal+1;
    valor_topo[pos('+', valor_topo)]:='s';
end; //while
//inicializacao de topoEND
for j:=1 to 2 do
    for k:=1 to 11 do
        valor_topoEnd[j,k]:=1;

    for j:=1 to 2 do begin
        for k:=1 to frmFTA1.tblfuzzytop.RecordCount do begin
            valor_topoEnd[j,k]:=valor_topoEnd[j,k]*(1-valor_produtorio[j,k])/vp1[i]);
        end;
    end;
    result:=valor_topoEnd;
end;

```

Estes algoritmos, fazem parte especificamente dos eventos “OnClick” pertencentes ao primeiro formulário do projeto, frmFTA1. Com exceção do frmFTA3, os demais formulários frmFTA2 e frmFTA4, possuem tabelas que estão associadas aos arquivos com as bases de dados e não possuem nenhum algoritmo de cálculo em suas unidades (“units”) associadas. Estes formulários com suas tabelas utilizam os recursos de banco de dados do Delphi, facilitando bastante o desenvolvimento de qualquer aplicativo.

No formulário frmFTA3, se o usuário não possui informações sobre os valores de **Fatores de Erro**, existe o cálculo para valores de referência (“default”). As linhas de código, descrevendo este processo são apresentadas na listagem 5.23:

Listagem 5.23 - realiza o cálculo “default” de Fatores de Erro.

```
procedure TfrmFTA3.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  with tblBEvent do begin
    first;
    while not eof do begin
      edit;
      if (fieldbyname('Probabilistic').asFloat > 0.01) then begin
        fieldbyname('Error Factor').asInteger:=5;
      end
      else if ((fieldbyname('Probabilistic').asFloat > 0.001) and
        (fieldbyname('Probabilistic').asFloat < 0.01)) then begin
        fieldbyname('Error Factor').asInteger:=3;
      end
      else begin
        fieldbyname('Error Factor').asInteger:=10;
      end;
    end;
  end;
end;
```

Os algoritmos implementados podem ser resumidos da seguinte forma: algoritmos de controle de fluxo de dados e algoritmos para cálculo específico. Estes algoritmos foram desenvolvidos para análise com a árvore de falhas completa, e são descritos:

Algoritmo 1 - probabilidades de evento topo. (Listagem 5.2)

Algoritmo 2 - valores do topo probabilístico da FTA completa (Listagem 5.3).

Algoritmo 3 - Transforma probabilidade/componente em valores fuzzy (Listagem 5.4).

Algoritmo 4 - probabilidades fuzzy do evento topo (Listagem 5.5).

Algoritmo 5 - modificação para refletir o cálculo dos valores fuzzy (Listagem 5.6).

Algoritmo 6 - para somar os números fuzzy (Listagem 5.7).

Algoritmo 7 - rotina principal para cálculo de FIM (Listagem 5.8).

Algoritmo 8 - modificações para o cálculo de FUIM (Listagem 5.9).

Algoritmo 9 - determina distância entre dois pontos - Euclideana (Listagem 5.10).

Algoritmo 10 - ordena os valores de FIM e FUIM (Listagem 5.11).

Semelhantemente, estes algoritmos foram desenvolvidos para a análise com cortes mínimos (MCS). Estes algoritmos podem ser divididos em dois grupos também, e são descritos:

Algoritmo 11 - cálculo dos valores da probabilidade do evento topo (Listagem 5.12).

Algoritmo 12 - modificação para refletir string associada à evento (Listagem 5.13).

Algoritmo 13 - modificações na rotina do topo para cortes mínimos (Listagem 5.14)

Algoritmo 14 - distributividade, para cada gate em cada nível da FTA (Listagem 5.15).

Algoritmo 15 - elimina os eventos repetidos - Idempotence (Listagem 5.16).

Algoritmo 16 - remove todos os cortes não mínimos(Listagem 5.17).

Algoritmo 17 - ordena a string do evento topo (Listagem 5.18).

Algoritmo 18 - ordena cada string em cada elemento da string topo (listagem 5.19).

Algoritmo 19 - operação de soma para o evento topo probabilístico (Listagem 5.20).

Algoritmo 20 - realiza a operação de soma com números fuzzy (Listagem 5.21).

Algoritmo 21 - realiza a operação de soma para o caso de FIM e FUIM (Listagem 5.22).

Algoritmo 22 - realiza o cálculo default de Fatores de Erro (Listagem 5.23).

As linhas de código apresentadas neste capítulo representam os algoritmos discutidos no capítulo 4 e implementados em linguagem de programação. Cada bloco contendo as linhas de código, descreve as etapas necessárias para determinação dos valores parciais e de valores finais de evento topo para a análise de árvore de falhas completa e análise com cortes mínimos. Este aplicativo, será utilizado então no capítulo 6, para o estudo de alguns exemplos, genéricos e reais, para efeito de validação do aplicativo fuzzyFTA.

6. RESULTADOS

Neste capítulo alguns exemplos serão apresentados para ilustrar a metodologia sugerida e verificar a confiabilidade dos resultados obtidos com o aplicativo criado neste trabalho. O primeiro exemplo refere-se ao mesmo empregado no trabalho de P.V. Suresh [37], que motivou o trabalho de tese. O segundo, refere-se a um caso exemplo considerado em recente trabalho [64] e que analisa um importante sistema da central nuclear de ANGRA-I, o Sistema Auxiliar de Água de Alimentação. O terceiro [56] e quarto [41] exemplos, referem-se à casos utilizados em outros códigos computacionais, e têm por finalidade comparar as metodologias empregadas em cada estudo.

6.1 - Primeiros Resultados com FuzzyFTA

O exemplo utilizado neste caso serve para ilustrar a metodologia empregada no trabalho de tese. Neste exemplo, uma árvore de falha simplificada será utilizada para representar o sistema de proteção de um reator de potência [WASH-1400].

Existem algumas formas de representar uma árvore de falhas e de forma diferente da gráfica, tradicionalmente empregada em vários exemplos. Uma destas forma está representada aqui neste trabalho:

G1 OR E1 G2 Equação 6.1

G2 AND G3 G4 Equação 6.2

G3 OR G5 E2 E3 E4 Equação 6.3

G4 OR G6 E4 E5 E6 Equação 6.4

G5 AND E6 E9 Equação 6.5

G6 AND E7 E8 Equação 6.6

onde G1,...,G6 são os portões (gates) da árvore e E1...E9, são os eventos básicos. O portão G1 é o evento topo, e os portões G5 e G6 são os terminais.

Os resultados obtidos quanto à probabilidade de falha e valores de ordenação (“ranking”) para diferentes componentes são apresentados como resultado do processamento realizado com o aplicativo FuzzyFTA.

A representação gráfica desta árvore pode ser vista na figura 6.1.

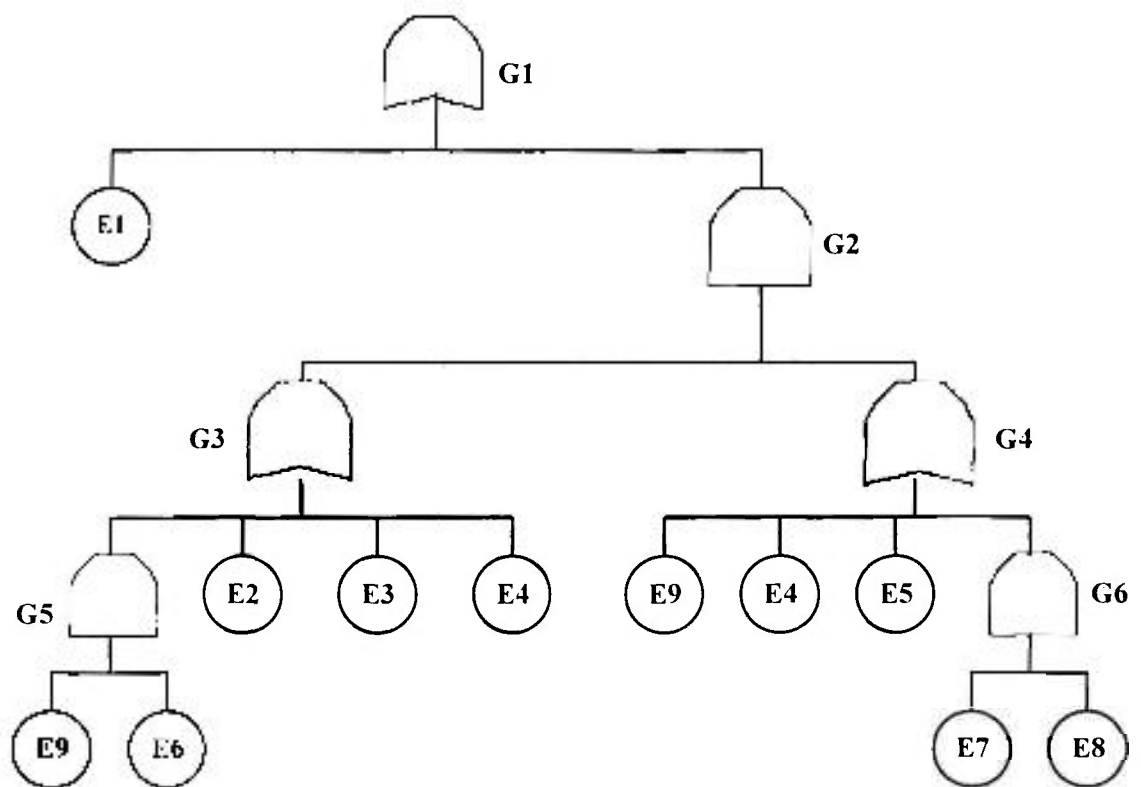


Figura 6.1 - Gráfico da árvore de falhas do exemplo 1, (P.V. Suresh).

Por inspeção na árvore pode-se determinar os cortes mínimos deste exemplo e verificar o cálculo de evento topo.

1ª. Ordem:

E1

Equação 6.7

E4	Equação 6.8
2ª. Ordem:	
E9 E6	Equação 6.9
E2 E9	Equação 6.10
E2 E5	Equação 6.11
E3 E9	Equação 6.12
E3 E5	Equação 6.13
3ª. ordem:	
E2E7E8	Equação 6.14
E3E7E8	Equação 6.15

onde os valores de probabilidade para este caso são:

$E1 = 1.7E-5$; $E2 = 0.001$; $E3 = 3.6E-4$; $E4 = 0.001$; $E5 = 3.6E-4$; $E6 = 6.1E-3$;
 $E7 = 6.1E-3$; $E8 = 9.7E-4$; $E9 = 9.7E-4$.

Substituindo estes valores nos eventos básicos presentes nos cortes mínimos de 1ª., 2ª e 3ª. ordem e somando os resultados, chega-se ao valor de evento topo igual à $1.02E-3$. Este valor é exatamente igual utilizando-se o aplicativo FuzzyFTA para o cálculo.

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os resultados obtidos com o aplicativo fuzzyFTA.

Eventos	Probab. De Falha	Fator De Erro	Limite Inf.	Limite Sup.	FIMmcs	ordem	FUIMmcs	ordem
1	1.7E-5	10	1.7E-6	1.7E-4	15.5	2	0.0008	6
2	1.0E-3	3	3.3E-4	3.0E-3	0.0239	3	0.001	2
3	3.6E-4	3	1.2E-4	1.1E-3	0.193	5	0.0009	4
4	1.0E-3	3	3.3E-4	3.0E-3	15.6	1	0.0116	1
5	3.6E-4	3	1.2E-4	1.1E-3	0.0321	7	1.2E-5	7
6	6.1E-3	4	1.5E-3	2.4E-2	0.176	6	0.0009	5
7	6.1E-3	4	1.5E-3	2.4E-2	6.4E-9	9	0.0	9

8	9.7E-4	10	9.7E-5	9.7E-3	6.4E-9	9	0.0	9
9	9.7E4	10	9.7E-5	9.7E-3	0.207	4	0.0010	3

Tabela 6.1 - Resultados obtidos com o aplicativo fuzzyFTA

Alfa-Level	Lower BoundMCS	Upper BoundMCS	Lower BoundFull	Upper BoundFull
0.0	0.000335	0.00345	2.18E-6	0.000277
0.1	0.000404	0.00319	4.01E-6	0.000246
0.2	0.000473	0.00294	5.90E-6	0.000217
0.3	0.000541	0.00269	7.84E-6	0.000188
0.4	0.00061	0.00244	9.84E-6	0.000161
0.5	0.000679	0.00219	1.19E-5	0.000135
0.6	0.000748	0.00195	1.40E-5	0.00011
0.7	0.000817	0.00172	1.62E-5	8.69E-5
0.8	0.000886	0.00148	1.84E-5	6.44E-5
0.9	0.000956	0.00125	2.07E-5	4.32E-5
1.0	0.00103	0.00103	2.30E-5	2.30E-5

Tabela 6.2 - Valores limites inferiores e superiores para a probabilidade de falha do evento topo com cortes mínimos e sem cortes, para diferentes valores de "alfa-levels".

No aplicativo fuzzyFTA, pode-se determinar o evento topo probabilístico com a árvore de falhas completa e o evento topo probabilístico considerando a análise da árvore de falhas com cortes mínimos (MCS).

Sem utilizar os recursos computacionais, foram determinados os dois eventos topos, ou seja, com e sem cortes mínimos. Os resultados para os dois valores de evento topo probabilístico, com e sem cortes mínimos, são idênticos aqueles determinados quando foi utilizado o aplicativo fuzzyFTA. Como esses algoritmos de cálculo, são a base para o cálculo na parte fuzzy, tanto para árvore completa quanto para a árvore reduzida (MCS), espera-se resultados confiáveis na parte fuzzy.

Os resultados adotados no caso de Suresh [37], para efeito de análise e comparação com os resultados realizados com o método de Monte-Carlo, foram feitos para árvore de falhas completa, tendo em vista os resultados obtidos com o aplicativo fuzzyFTA. Utilizando este método, Suresh, obteve no intervalo de confiança de 90%, para a probabilidade do topo, o valor de $1.32E(-5)$ à $3.3E(-4)$.

No caso da representação fuzzy, o intervalo total possível é $2.30E(-6)$ à $8.33E(-4)$, com o intervalo de possibilidade maior (0.9) de $3.01E(-5)$ à $7.36E(-5)$. Isto confere um intervalo de $4.35E-5$ e menor para o caso fuzzy, contra o intervalo de $32.14E-5$ no método Monte-Carlo. O tempo computacional na abordagem convencional probabilística é muito superior se comparado ao método fuzzy. No método probabilístico, e considerando uma distribuição a nível de sistema, uma vez mais a incerteza estaria sendo introduzida; no método fuzzy tal fato que ocorre a nível de componente.

Neste trabalho de tese, o intervalo total obtido para o caso sem cortes mínimos, é de $2.18E-6$ à $2.77E-4$, e o intervalo maior (0.9) é de $2.07E-5$ à $4.32E-5$, conferindo resultados e conclusões semelhantes, ou seja, um valor de $2.25E-5$ para a metodologia fuzzy (veja apêndice B).

Para o caso com cortes mínimos, o intervalo total é de $3.35E-4$ à $3.45E-3$, e o intervalo máximo de (0.9) está entre $9.56E-4$ à $1.25E-3$, produzindo um valor da ordem de $29.4E-5$ para a metodologia fuzzy utilizando cortes mínimos e menor se comparado aos estudos feitos com o método Monte-Carlo.

6.2 - Aplicação da Metodologia

Para este caso, foi considerado um exemplo de um sistema de segurança da central nuclear de ANGRA-I, e que servirá para avaliar as possibilidades futuras de recomendações quanto a utilização desta metodologia e aplicativo para o processo de

licenciamento de centrais nucleares, e permitirá uma vez mais avaliar os algoritmos definidos internamente ao aplicativo fuzzyFTA.

O sistema adotado é o Sistema Auxiliar de Água de Alimentação. Neste exemplo foi considerada a análise de falhas de causa comum dos componentes, devido à redundância implementada como requisito de segurança e ao aumento na confiabilidade do sistema. Também foi empregado o Modelo Paramétrico das Letras Gregas Múltiplas [veja ref. 64].

Foi considerado, também, três situações para o tempo de missão de operação com $t = 0$, partida da central, $t = 8$ horas e $t = 24$ horas. Foi adotado, para comparação entre os dois estudos, somente os dados relativos à partida da central.

Ficou demonstrado internamente ao trabalho referência adotado [64] que, as falhas de causa comum constituem-se na principal fonte para a não-confiabilidade de instalações que possuam sistemas redundantes, especialmente instalações nucleares de potência.

A árvore desenvolvida para analisar este sistema pose ser verificada em sua forma booleana, semelhantemente ao exemplo anterior, e representada graficamente através da figura 6.2:

$$G1 \text{ AND } G2 \text{ } G3 \quad \text{Equação 6.16}$$

$$G2 \text{ AND } G4 \text{ } G5 \quad \text{Equação 6.17}$$

$$G3 \text{ AND } G6 \text{ } G7 \quad \text{Equação 6.18}$$

$$G4 \text{ OR } G8 \text{ } G12 \text{ } G16 \quad \text{Equação 6.19}$$

$$G5 \text{ OR } G9 \text{ } G13 \text{ } G18 \quad \text{Equação 6.20}$$

$$G6 \text{ OR } G10 \text{ } G14 \text{ } FC \quad \text{Equação 6.21}$$

$$G7 \text{ OR } G11 \text{ } G15 \text{ } FC \quad \text{Equação 6.22}$$

$$G8 \text{ OR } G16 \text{ } G17 \quad \text{Equação 6.23}$$

$$G9 \text{ OR } G18 \text{ } G19 \quad \text{Equação 6.24}$$

$$G10 \text{ OR } G20 \text{ } FT \quad \text{Equação 6.25}$$

G11 OR G20 FT	Equação 6.26
G12 OR G21 G22 VS1 VG	Equação 6.27
G13 OR G23 G24 VS4 VG	Equação 6.28
G14 OR G25 G26 VS3 VG	Equação 6.29
G15 OR G27 G28 VS2 VG	Equação 6.30
G16 OR MS1 MD12	Equação 6.31
G17 OR BS1 FD-FCC BG	Equação 6.32
G18 OR BS3 FD-FCC BG	Equação 6.33
G19 OR MS2 MD12	Equação 6.34
G20 OR BS2 FD-FCC BG	Equação 6.35
G21 OR VD12 VD14	Equação 6.36
G22 OR VT123 VT134 VT124	Equação 6.37
G23 OR VD14 VD24 VD34	Equação 6.38
G24 OR VT124 VT134 VT234	Equação 6.39
G25 OR VD13 VD23 VD34	Equação 6.40
G26 OR VT123 VT134 VT234	Equação 6.41
G27 OR VD12 VD23 VD24	Equação 6.42
G28 OR VT123 VT124 VT234	Equação 6.43
G29 OR BD12 BD13	Equação 6.44
G30 OR BD12 BD23	Equação 6.45
G31 OR BD13 BD23	Equação 6.46

onde G1....G31 são os portões ("gates") da árvore e G1 é o evento topo. Os demais são eventos básicos com falhas simples: VS1, VS2, VS3, VS4, BS1, BS2, BS3, MS1, MS2; falhas duplas: VD12, VD13,; falhas triplas: VT123, VT124,.....; falha geral: BG e VG; falha turbina: T; e falha do tanque de água: FC.

Foi mantida aqui a mesma nomenclatura, por questões de eventual necessidade de consultas futuras no documento original [64].

componentes

M - motor

V - válvula

B - bomba

T - turbina

C - tanque de água

tipos de falhas

S - simples

D - dupla

T - tripla

G - geral

Neste trabalho de referência, foi adotado uma aproximação de simetria, descrita em detalhes no trabalho, onde: $V1 = p(VS1) = p(VS2) = p(VS3) = p(VS4)$;

$p(VG) = V4$;; $p(BS1) = p(BS2) = p(BS3) = B1$.

Os valores de probabilidades dos eventos básicos para o caso de partida da central:

$V1 = 3.7E-3$; $V2 = 4.3E-5$; $V3 = 6.4E-6$; $V4 = 3.6E-4$;

$B1 = 8.7E-4$; $B2 = 1.8E-4$; $B3 = 4.1E-4$;

$M1 = 1.4E-3$; $M2 = 1.6E-4$; $T = 1.6E-4$; $C = 1.0E-7$.

Não houve preocupação em discriminar os componentes, apenas em quantos componentes do grupo foram afetados. Foi adotado, com este procedimento, que se está admitindo que a probabilidade de ocorrência de eventos similares envolvendo

tipos similares de componentes é a mesma. Esta aproximação implicará que a probabilidade de falha de um dado evento básico dependerá apenas do número de componentes envolvidos e não de quais componentes específicos falharam [64].

A representação gráfica da árvore de falhas é vista na figura 6.2, e os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4.

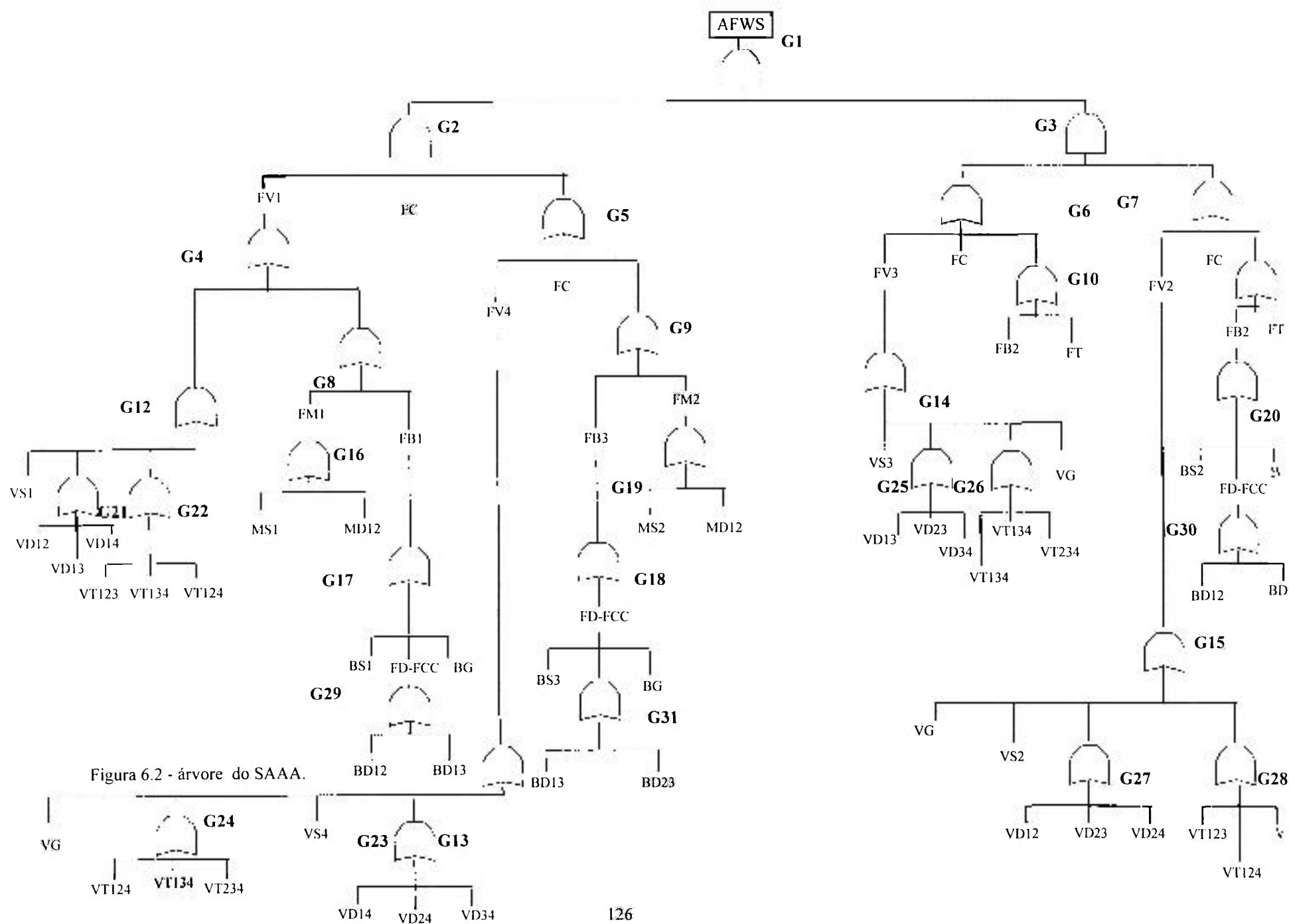
Quanto à (i) descrição do sistema, (ii) simplificações esquemáticas do projeto original, viabilizando o estudo da sua confiabilidade, e (iii) definição dos critérios de falha do sistema, os detalhes foram discutidos no trabalho de referência, e podem ser também vistos no Relatório Final de Análise de Segurança da Central de Angra I (FSAR - "Final Safety Analysis Report"). Este relatório, distribuído em 15 volumes, descreve completamente o projeto de engenharia e de segurança da central.

Na descrição do sistema, três funções de projeto são fundamentais: a) manter alimentação de água nos geradores de vapor, na ausência do sistema de água de alimentação, proporcionando remoção de calor residual até a entrada do sistema de remoção de calor residual, (b) fornecer água aos geradores, para gerar vapor numa partida à frio para aquecimento e selagem, e (c) manter níveis de água no gerador de vapor, para remoção de calor em baixa potência, e em situações especiais, garantindo um inventário mínimo de vazão para os geradores.

Quanto à simplificação, consiste primeiro em analisar o sistema em alinhamento normal, e admitir em segundo, que a água do tanque que alimenta, uma vez bombeada não retorne a este, desprezando a existência da linha de recirculação.

Quanto à árvore de falhas neste trabalho de referência, o autor como objetivo principal, procurou determinar a probabilidade de ocorrência do evento topo do sistema em questão, somente após estabelecer certos critérios de falha do sistema. O evento topo analisado é o não fornecimento ou fornecimento insuficiente de água de alimentação para ambos os geradores de vapor. Os componentes adotados para análise por árvore de falhas, foram os considerados ativos (bombas, válvulas, etc.). Os componentes passivos possuem contribuições insignificantes para o estudo de confiabilidade.

De posse da árvore de falhas, o processo de cálculo do evento topo é imediato.



Por inspeção visual, foram determinados um total de 128 cortes mínimos e estão relacionados internamente neste trabalho de referência [64]. Com os valores das probabilidades determinadas para os eventos, o valor do evento topo probabilístico determinado foi **7.94E-4**. Para este caso foram apenas adotados os valores e resultados, calculados internamente no trabalho de referência, não havendo necessidade, como no caso anterior, de se determinar os cortes mínimos e em seguida o valor do evento topo probabilístico, sem uso computacional.

EVENTO	CRÍTICO	INCERTEZA
1 - VS1 / 13-VT234 / 25- T	20 / 22 / 4	10 / 24 / 7
2 - VS2 / 14 -VG / 26- C	19 / 2 / 13	20 / 2 / 22
3 - VS3 / 15 -BS1 / 27- VT124	18 / 23 / 17	19 / 17 / 18
4 - VS4 / 16 -BS2	21 / 11	15 / 14
5 - VD12 / 17-BS3	16 / 27	12 / 27
6 - VD13 / 18-BD12	15 / 5	13 / 4
7 - VD14 / 19-BD13	3 / 7	3 / 6
8 - VD23 / 20 -BD23	6 / 9	5 / 9
9 - VD24 / 21-BG	10 / 1	11 / 1
10 - VD34 / 22-MS1	25 / 24	25 / 21
11 - VT123 / 23-MS2	14 / 27	23 / 27
12 - VT134 / 24-M12	12 / 8	16 / 8

Tabela 6.3 - Resultados obtidos com o aplicativo fuzzyFTA (veja ap. B).

Utilizando os valores apresentados na tabela, pode-se fazer algumas comparações entre um estudo e outro. Os resultados do trabalho referenciado, serviram como base para realização de uma nova análise, feita pelo autor, e fazem parte de estudos recentes [65] utilizando o SAAA e recebeu o nome de Estudo de Sensibilidade dos Parâmetros utilizados na Análise da Confiabilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar de ANGRA-I.

Foram gerados três conjuntos de resultados, relacionados ao trabalho anterior do mesmo autor [64], e referem-se à partida da central, missões de oito horas e missões de 24 horas. Os resultados mostram os valores de importância a nível de parâmetros algébricos, evoluindo no tempo, quantificando o tipo de falha se simples, dupla, tripla e total para válvula e semelhantemente para o motor e bomba.

V1	V2	V3	V4	T
3.2E-3	2.7E-3	1.6E-4	4.6E-1	1.7E-2
B1	B2	B3	M1	M2
1.3E-3	1.1E-2	5.2E-1	1.4E-3	1.9E-4

Tabela 6.4 - Importância dos termos algébricos.

Somente os valores referentes à partida de central foram utilizados para efeito de comparação, e confirmam com os resultados obtidos com o aplicativo fuzzyFTA, no que se refere aos componentes como crítico e contribuição para incerteza.

6.3 - Comparação entre Metodologias

Dois exemplos foram realizados, utilizando-se os casos exemplos analisados em dois aplicativos computacionais [41,56], de forma a permitir a comparação entre as metodologias implementadas em linguagens diferentes daquela utilizada no aplicativo fuzzyFTA.

- Exemplo do Laboratório Sandia (código PHASER) e comparação.

Este exemplo está relacionado a metodologia de números híbridos apresentada no capítulo 2 deste trabalho de tese. Esta metodologia tem sido estudada extensivamente no Laboratório Nacional de Sandia e para tal o aplicativo PHASER [56] foi desenvolvido para permitir o estudo e análise deste tipo de abordagem.

No manual do código PHASER existem alguns exemplos, e um destes exemplos, foi considerado neste trabalho de tese, para efeito de comparação de resultados obtidos utilizando-se um e outro aplicativo. Permite desta forma avaliar os algoritmos empregados em ambos os casos.

O exemplo em questão, utiliza uma árvore de falhas onde na análise de incertezas fuzzy, cada evento básico é tratado como um número fuzzy para cada valor de probabilidade. Esta análise ilustra como estas incertezas são propagadas através da árvore até a determinação do evento topo. Foi determinado neste exemplo o evento topo fuzzy e utilizado para efeito de comparação com aquele obtido pelo uso do aplicativo fuzzyFTA.

A árvore booleana é apresentada, semelhantemente ao exemplo anterior e graficamente representada na figura 6.3.

G1-loss-of-safety AND G2-2935Pas G3-2969-Pass LAC-Power Equação 6.47

G2-2935-Pass OR G4-D2-US2 2935-Pre-Closed Missile-Traj Equação 6.48

G3-2969 OR 2969-Pre-Closed Pream-Random AMAC-Input Equação 6.49

G4-D2-US2 AND TSSG-Sw-Pre Traj-Correct-Ran Equação 6.50

onde G1....G4 são os portões e G1 é o portão do evento topo associado. Os demais são os eventos básicos para este exemplo. Os valores de probabilidade são:

2935-Pre-Closed	= 3.5E-4
2969-Pre-Closed	= 3.5E-4
LAC-Power	= 1.0E-4
Missile-Traj	= 1.0E-3
Prearm-Random	= 0.5E-6
Traj-Correct-Ran	= 3.8E-5
TSSG-Sw-Pre	= 1.0E-1
AMAC-Input	= 0.5E-6

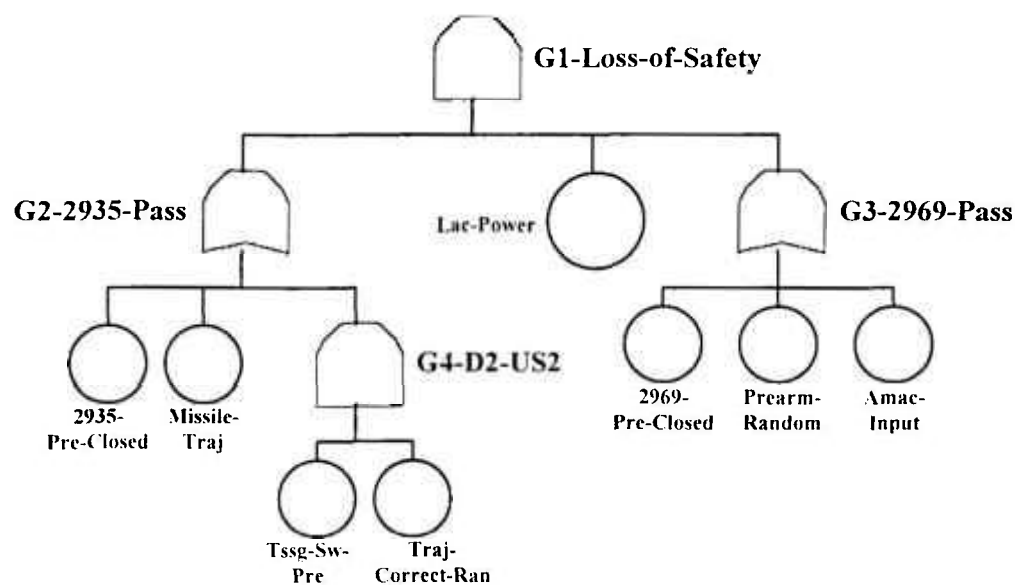


Figura 6.3 - Gráfico da árvore do exemplo do aplicativo PHASER (Lab. de SANDIA).

De forma semelhante ao caso anterior os valores de evento topo probabilístico total e com cortes mínimos (MCS) foram previamente calculados sem o uso de recursos computacionais e em seguida comparados com aqueles obtidos pelo uso do aplicativo FuzzyFTA. Os resultados obtidos são idênticos.

No trabalho referência [56] que descreve o programa PHASER, foram determinados os cortes mínimos e utilizados os valores de probabilidades para determinar o evento topo. Os cortes mínimos para este caso, faz uso de outro aplicativo, conhecido como SABLE, para determinação dos cortes mínimos. Estes cortes são:

G1-loss-of-safety = Equação 6.51

$$\begin{aligned}
 & \text{Lac-Power} * \text{Amac-Input} * \text{Missili-Traj} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{Prearm-Random} * \text{Missile-Traj} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{2969-Pre-Closed} * \text{Missile-Traj} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{Amac-Input} * \text{2935-Pre-Closed} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{Prearm-Random} * \text{2935-Pre-Closed} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{2969-Pre-Closed} * \text{2935-Pre-Closed} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{Amac-Input} * \text{Tssg-Sw-Pre} * \text{Traj-Correct-Ran} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{Prearm-Random} * \text{Tssg-Sw-Pre} * \text{Traj-Correct-Ran} + \\
 & \text{Lac-Power} * \text{2969-Pre-Closed} * \text{Tssg-Sw-Pre} * \text{Traj-Correct-Ran}
 \end{aligned}$$

Com os cortes mínimos e os valores de probabilidades pode-se determinar o evento topo probabilístico. E o valor calculado para o primeiro exemplo é 4.8E-11. Este foi o mesmo valor encontrado utilizando o aplicativo FuzzyFTA.

Neste mesmo manual consta o cálculo do segundo exemplo, e determina o evento topo fuzzy. Os valores determinados são: 1.1E-17, 2.0E-15, 2.0E-10 e 2.2E-8. A diferença num e noutro caso, é que a função utilizada no PHASER, foi trapezoidal e a do aplicativo fuzzyFTA foi triangular, mas os valores limite inferior e superior são semelhantes considerando o intervalo do universo de discurso da função de pertinência do evento topo fuzzy. Para o aplicativo FuzzyFTA os valores de “lowerbound” e “upperbound” são: 1.29E-13 e 2.34E-8. Esta comparação pode ser vista na figura 6.4 (veja apêndice B – Visualização de Dados).

Perda de Segurança ("Loss-of-Safety")

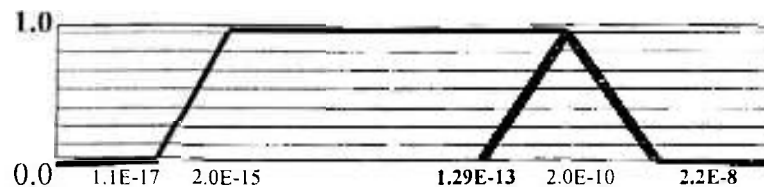


Figura 6.4 - Incerteza do Evento topo Fuzzy para o exemplo 2 do manual PHASER.

- Exemplo do IRRAS e comparação de resultados.

Este exemplo foi desenvolvido para permitir ao usuário do aplicativo IRRAS, compreender todos os detalhes dos cálculos propostos em sua metodologia. Não reflete qualquer sistema real de uma planta de engenharia, apenas uma árvore de falhas para demonstração de como os cálculos devem ser feitos.

A árvore é apresentada semelhantemente ao exemplo anterior utilizando a expressão booleana. Este exemplo, possui unicamente o cálculo tradicional probabilístico para o evento topo, pois o aplicativo IRRAS não foi desenvolvido para análise de evento topo Fuzzy. Portanto, somente o valor do evento topo probabilístico será comparado.

$$G1 \text{ AND } G2 \text{ } G3 \quad \text{Equação 6.52}$$

$$G2 \text{ OR } G4 \text{ } G5 \text{ } G7 \quad \text{Equação 6.53}$$

$$G3 \text{ OR } B1 \text{ } B3 \text{ } B4 \quad \text{Equação 6.54}$$

$$G4 \text{ AND } G6 \text{ } B1 \quad \text{Equação 6.55}$$

$$G5 \text{ AND } G6 \text{ } B3 \text{ } B5 \quad \text{Equação 6.56}$$

$$G6 \text{ OR } B2 \text{ } B4 \quad \text{Equação 6.57}$$

$$G7 \text{ AND } B1 \text{ } B3 \text{ } B5 \quad \text{Equação 6.58}$$

onde G1,...,G7 são os portões e G1 é o portão do evento topo associado. B1,...,B5, são os eventos básicos para este exemplo. Os valores de probabilidades são:

$B1 = 0.01$; $B2 = 0.02$; $B3 = 0.03$; $B4 = 0.04$; $B5 = 0.05$.

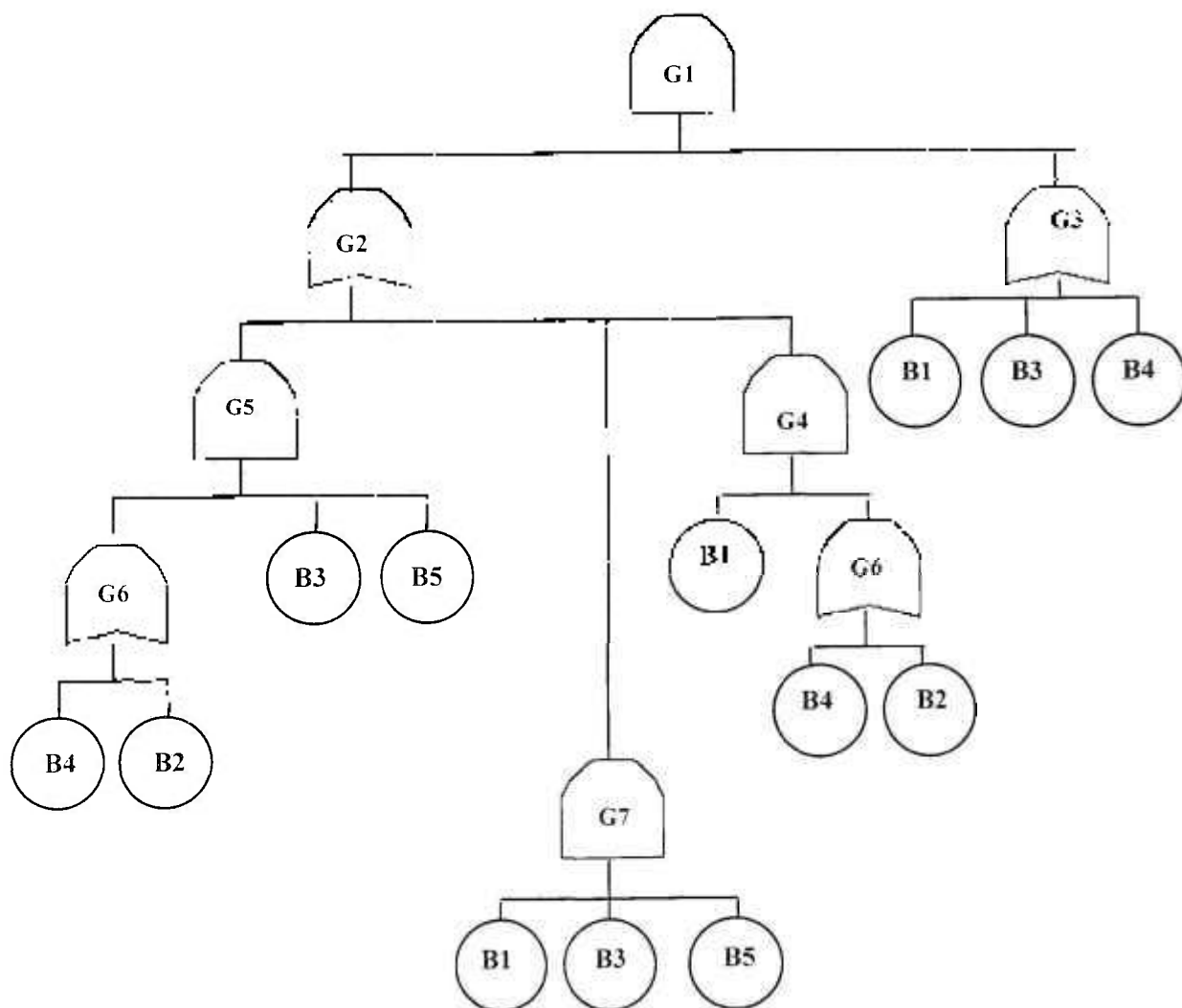


Figura 6.5 - Gráfico da árvore do aplicativo IRRAS.

Neste exemplo foram adotados, também, os cálculos feitos no manual do IRRAS. Para esta árvore os cortes mínimos determinados foram:

2ª. Ordem:

B1 B2

Equação 6.59

B1 B4 Equação 6.60

3ª. Ordem:

B1 B3 B5 Equação 6.61

B2 B3 B5 Equação 6.62

B3 B4 B5 Equação 6.63

Substituindo os valores de probabilidade dos eventos básicos, determina-se o valor de **7.05E-4** para o evento topo probabilístico. Este mesmo valor foi encontrado através do aplicativo fuzzyFTA.

Os resultados do evento topo probabilístico da árvore completa e da árvore reduzida (MCS), calculados com o aplicativo FuzzyFTA, foram comparados contra aqueles obtidos sem o uso computacional e verificou-se que os resultados permaneceram idênticos (veja apêndice B – Visualização de Dados).

Neste capítulo, foram apresentados alguns exemplos, no sentido de validar o aplicativo criado neste trabalho de tese. As conclusões quanto aos resultados alcançados neste capítulo 6, servirão de motivo das discussões apresentadas no capítulo 7.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho constituiu-se no desenvolvimento de uma metodologia de análise e criação de um aplicativo, para realização de cálculos independentes, referentes a determinação do evento topo , Medidas de Importância e Medidas de Incertezas de Importância , utilizando a técnica de árvores de falhas.

Esta metodologia foi originalmente desenvolvida para determinação de componentes críticos em um sistema de engenharia e para avaliar a contribuição de incerteza de cada componente para incerteza geral do sistema analisado. Poderá ser utilizado para qualquer outro tipo de instalação diferentemente da nuclear, tal como uma planta de petróleo.

Os modelos desenvolvidos bem como os algoritmos propostos, estão de acordo com o que tem de mais atual na literatura sobre o assunto.

Os resultados de cálculos apresentados no capítulo 6 desta tese, referem-se tão somente a exemplos genéricos e um caso específico da central nuclear de ANGRA-I, o do SAAA - Sistema Auxiliar de Água de Alimentação.

Todos os resultados apresentados para estes exemplos proporcionaram verificar e validar o aplicativo FTA criado para demonstrar a metodologia proposta neste trabalho de tese.

Os resultados apresentados para o caso de Angra-I, ficaram compatíveis com aqueles obtidos em estudos recentes e poderá servir para completar os estudos de avaliação de segurança, onde a ausência de informações nos dados provenientes de um ou mais componente de um sistema de segurança, possa ser superada pela utilização de uma metodologia que faça uso da técnica .

Antes, porém, algumas modificações no aplicativo serão necessárias para expandir a possibilidade de cálculo feito com situações as mais adversas possíveis, com relação ao sistema analisado.

O programa desenvolvido pode ser facilmente adaptado para refletir modificações que venham a ocorrer futuramente na instalação em que, um ou outro sistema analisado, tenha sido modificado.

É recomendável a utilização deste método para análise de outros sistemas considerados de segurança em uma instalação nuclear.

7.1 - Observações Iniciais sobre os Resultados.

Para grandes sistemas e complexos tais como instalações de potência nuclear, instalações químicas, etc., a estimativa da não-confiabilidade de sistemas é derivado da não confiabilidade de componentes. A incerteza na não-confiabilidade de componentes entre outros fatores é causado pela ausência de dados de falhas, variações devido à diversas fontes de relatórios e devido à variações nas condições ambientais. Na estatística clássica, a incerteza da não-confiabilidade é frequentemente medida pela extensão do intervalo de confiança. Entretanto é muito difícil obter analiticamente o intervalo de confiança da não-confiabilidade de sistemas, à partir do intervalo de confiança dos componentes. Alguns métodos existem, mas são muito complicados. Na abordagem **Bayesiana**, a não-confiabilidade de um componente é tratado como uma variável randômica e a expansão ("spread") de sua distribuição corresponde a sua incerteza. Para determinar a incerteza da não-confiabilidade de um sistema, vários métodos estão disponíveis na literatura, entre os quais o método dos momentos é um dos mais confiáveis. Neste método, e semelhantemente ao proposto, os momentos da não-confiabilidade do sistema são determinados dos momentos da não-confiabilidade dos componentes, e à partir destes momentos pode-se derivar a distribuição da não-confiabilidade do sistema utilizando o método da entropia máxima. Da mesma forma na metodologia Bayesiana a desvantagem principal é que, a incerteza da não confiabilidade dos componentes, deve ser expressa como uma distribuição de probabilidade.

Para os sistemas em planta nuclear, no caso Angra-I, é muito difícil avaliar as probabilidades de algumas falhas, felizmente por não terem ocorridos antes. Nestes casos a estatística clássica não auxilia os cálculos. Para sistemas em operação, onde alterações sejam frequentes, o histórico passado dos dados, em nada auxilia na estimativa da não-confiabilidade de sistemas utilizando a estatística

clássica. Em muitos casos, as pessoas que possuem conhecimento do funcionamento dos sistemas e suas falhas características, não estão familiarizados com a matemática estatística e somente conseguem se expressar de uma forma convencional. Novamente, o método Bayesiano não deve ser adequado. Por outro lado, utilizar um novo tipo de formalismo que possa capturar a subjetividade e a imprecisão dos dados de falhas empregados na árvore de falhas é essencial. Sendo assim, a teoria de lógica fuzzy fornece a metodologia mais adequada para este tipo de problema.

Sobretudo, existe uma deficiência inerente na avaliação de risco probabilístico ou análise de segurança e estas preocupações principalmente são devido à grande quantidade de incertezas associadas aos resultados que consideram o uso de dados de falhas de entrada imprecisos e as incertezas de modelos devido a falhas dependentes, falhas de causas comum, falhas humanas, período de operação da planta, etc. Os métodos propostos considerando o uso de lógica fuzzy são relativamente complexos e neste trabalho foi sugerido um método computacional eficiente e rápido.

7.2 - Críticas ao Modelo.

Como a preocupação inicial, foi a de estabelecer uma metodologia nova, utilizando o conceito de lógica fuzzy para o cálculo de incertezas, foi utilizado o algoritmo de redução booleana para o cálculo dos cortes mínimos. Os resultados apresentados podem inicialmente apresentar alguma diferença se uma modificação no algoritmo de determinação do evento topo probabilístico com cortes mínimos for adotada. Mas a preocupação principal, é com relação ao tempo computacional exigido em situações onde o número de eventos básicos considerados seja relativamente grande, da ordem de 400 ou mais eventos. É relevante a consideração de otimização do algoritmo de cortes mínimos (MCS), pois este algoritmo serve como base para determinação do evento topo, cálculo de medidas FIM e FUIM. Sendo assim o cálculo para estes valores exige um tempo computacional ainda maior, baseado em suas próprias definições, se o número dos eventos básicos considerados na árvore de falhas aumenta. A utilização de um algoritmo otimizado,

pode a princípio, minimizar bastante o tempo computacional necessário para determinação destas medidas de importância.

Quanto ao cálculo do evento topo, foi utilizado para efeito de simplificação de cálculos, uma função de pertinência triangular. A adoção de uma função trapezoidal não altera para melhor as conclusões alcançadas com os resultados no caso de uma função triangular. Seria mais interessante e realista a adoção de uma função de pertinência que reflita a experiência do especialista da área. Esta modificação pode ser facilmente implementada, no futuro, no aplicativo FTA.

Vale ressaltar que, o processo de melhoria tecnológica com relação aos processadores, diferentemente de outras épocas, tem sido bastante rápida. Hoje, sob as mesmas condições, já se pode contar com processadores do tipo Pentium 266 MHz, cerca de 100% mais rápido do que um Pentium 133 MHz. Todos os cálculos feitos com o aplicativo FTA, foram realizados em computador Pentium 100 MHz. Se estes cálculos forem realizados em um computador com configuração melhor, com certeza reduzirá o tempo computacional minimizando a preocupação devido ao algoritmo utilizado.

7.3 - Recomendações e Sugestões Futuras

Algumas recomendações foram feitas, no sentido de tornar a metodologia aqui apresentada mais atualizada e o aplicativo mais amigável.

7.3.1 - Quanto ao Aplicativo Demo FTA

Os estudos posteriores que serão realizados não podem deixar de considerar a possibilidade de implementar algumas alternativas e melhorias no aplicativo. Algumas estão relacionadas abaixo, podendo evidentemente surgir outras novas sugestões.

- Criar um tutorial

- Criar um “help”
- Imprimir árvore
- Implementar as abordagens descritas a seguir.

Existe um grande potencial associado ao aplicativo fuzzyFTA, e é devido a escolha feita quanto ao ambiente de desenvolvimento Delphi 3.0 empregado para criar o aplicativo. Nas figuras 7.1 e 7.2 pode-se ver a forma com que aplicativos desenvolvidos neste tipo de ambiente acessam bases de dados, e até em outros ambientes da mesma empresa proprietária. A Borland, trabalha com o conceito de acesso nativo facilitando muito a utilização e a manipulação de grandes bases de dados [66][67]. O BDE (“Borland DataBase Engine”) permite que esta tarefa seja feita de forma nativa e, também, através de “drivers”. Pode-se, assim, conectar-se a qualquer tipo de banco de dados de empresas, tais como, Oracle e outros.

Desta forma o aplicativo FTA, desenvolvido em Delphi 3.0, possui um grande potencial para acesso a base de dados em estudos futuros.

7.3.2 - Modelo Híbrido

A análise de incertezas admite tipicamente separada, fontes de incertezas cumulativas e subjetivas, mas não combina sistematicamente as duas, muito embora uma grande quantidade de dados utilizados nas análises sejam particularmente cumulativos e particularmente subjetivos. Recentemente foi desenvolvido por J. Arlin Cooper et al [1997], uma metodologia para combinar matematicamente estas duas formas de fontes de dados de incertezas, baseada numa abordagem nova de número híbrido. A metodologia pode ser utilizada em conjunto com várias outras técnicas tradicionais, tais como Avaliação Probabilística de Risco (APR) e Suporte à Decisão em Análise de Risco. O uso de números híbridos é considerado como um método potencial para representar a combinação de informações subjetivas e cumulativas, mas algumas operações matemáticas, tais como multiplicação, não estariam sendo realizadas pela própria definição do número híbrido. Cooper, apresentou em seu trabalho proposto, uma maneira de evitar este tipo de impedimento. Descrevendo um número híbrido como uma

distribuição de probabilidade que é conhecida somente “fuzzificadamente”, ou alternativamente como uma distribuição randômica de números , métodos são desenvolvidos adequando operações aritméticas para permitir cálculos matemáticos complexos. Neste trabalho o autor mostra como a informação sobre a subjetividade relativa (a taxa do conhecimento subjetivo em relação ao cumulativo em torno de um dado particular) podem ser incorporadas. Foram desenvolvidas técnicas para apresentar visualmente a informação sobre a incerteza, com componentes cumulativos e subjetivos da incerteza, bem como a taxa de conhecimento em torno dos dois componentes, se tornam evidentes. A técnica proposta demonstra ter a capacidade de processar informação sobre incerteza para dados independentes e não correlacionados, e para alguns tipos de dados dependentes e correlacionados.

Se comparado as demais recomendações, se afasta de abordagens tradicionais dentro do contexto que utiliza operações booleanas e de lógica . Até o momento o desconhecimento da existência de outros trabalhos, posteriores a sua publicação, torna um fato curioso e desperta atenção para, se a metodologia for utilizada, deve ser mantida no âmbito da pesquisa ou adotada como método alternativo.

7.3.3 - Uma Abordagem Modular para Analisar Árvores de Falhas Estática e Dinâmica.

Existem basicamente três técnicas analíticas para avaliação de confiabilidade e são a Árvore de Falhas, os Diagramas de Decisão Binária (DDB) e cadeias de **Markov**. Cada uma destas técnicas tem certas vantagens e desvantagens e a escolha depende do sistema analisado. A árvore de falhas, sem dúvida é a mais popular escolha para construção analítica de um sistema. Fornece uma representação compacta do sistema e é facilmente interpretada. Entretanto, árvore de falhas não possui riqueza de modelagem e seu tempo de solução aumenta exponencialmente com o tamanho do sistema analisado.

No trabalho de Gulati e Dugan [55], uma abordagem híbrida e modular é sugerida para analisar simultaneamente árvore de falhas estática e dinâmica. Fornece uma combinação utilizando DDB, para árvores estáticas e cadeias de Markov para árvores dinâmicas acoplada com a identificação de sub-

árvores independentes. São sugeridos algoritmos para modularização que integram os resultados obtidos de soluções separadas dos módulos independentes (sub-árvores). Em outro trabalho publicado do mesmo autor, ele apresenta um programa computacional denominado de DIFtree, onde esta abordagem proposta foi implementada. Este tipo de tratamento permite analisar árvores de falhas complexas e grandes, onde o processo é relativamente tedioso. Segundo os autores, não existe comercialmente nenhum código computacional conhecido que forneça uma solução exata do sistema analisado. Outras ferramentas fornecem em geral uma solução aproximada ou solucionam árvores pequenas.

Para uma abordagem sem tratamento de incertezas é provavelmente muito conveniente e fica a sugestão para implementações futuras.

7.3.4 - Uma Abordagem Inteligente.

Para estudos envolvendo tratamento de incertezas, ainda prevalece a abordagem para o sistema analisado. Se existem informações suficientes sobre os componentes, através de seu histórico de operação, a metodologia convencional booleana com árvores de falhas acoplada com a nova abordagem modular estática e dinâmica, se aplica diretamente e o tratamento de incertezas fica por conta da utilização da teoria. Caso faltem informações sobre o histórico de operação dos componentes, novamente a teoria se aplica acompanhada da opinião de um especialista para quantificar os valores de determinação dos limites inferior e superior da função de pertinência.

De forma similar à representação modular estática e dinâmica, onde a árvore de falhas é dividida em árvores menores, será conveniente tratar as árvores de falhas, adicionalmente a esta abordagem, com uma ou mais árvores menores existindo pouca ou nenhuma informação sobre o histórico de operação de seus eventos básicos, fazendo-se assim a necessidade da abordagem para estimá-los e determinar as incertezas associadas. Em outras palavras, será adotar um portão ("gate") inteligente, onde ele saberá identificar o tipo de informação que chega até

ele (estática, dinâmica) e repassa a um nível superior para continuidade de processamento.

Posteriormente é interessante comparar os resultados obtidos com este tipo de abordagem e àquela anteriormente citada sobre Modelagem Híbrida, apresentada no item 7.3.2, de forma a verificar a mais conveniente para representar melhor as fontes de incertezas.

Em última análise e comparativamente a uma metodologia de diagnóstico em tempo real, acredita-se que seja mais fácil trabalhar com uma metodologia que permita fazer recomendações de manutenção e modificações de sistemas na planta analisada, do que adotar uma metodologia em tempo real. Sabe-se que, para implantação deste tipo de técnica na planta, deve-se passar por sérias dificuldades, que vai desde o impedimento legal no caso de uma instalação nuclear, onde a entidade reguladora responsável pelo licenciamento é a primeira grande barreira, até um processo cultural, em que o operador de instalações do tipo petroquímicas e outras, são os primeiros a causarem impedimentos adicionais.

As conclusões apresentadas neste capítulo, refletem observações feitas com a metodologia proposta utilizando a lógica e árvore de falhas do aplicativo criado para demonstrar esta metodologia. Os aspectos de contribuição da presente pesquisa são atribuídos a metodologia proposta e à criação do aplicativo FTA, extremamente amigável, integrando cálculo de cortes mínimos com determinação de evento topo e medidas de importância utilizando o conceito fuzzy.

Quanto aos dois aplicativos mais importantes, IRRAS e PHASER, no primeiro determina-se valores que consideram uma abordagem estritamente convencional, ou seja, probabilística, e no segundo o tratamento fuzzy adotado, depende de programas externos para fornecer dados de entrada.

Espera-se, desta forma, ter contribuído para o desenvolvimento da área de confiabilidade de sistemas, através do uso de ferramentas de inteligência computacional.

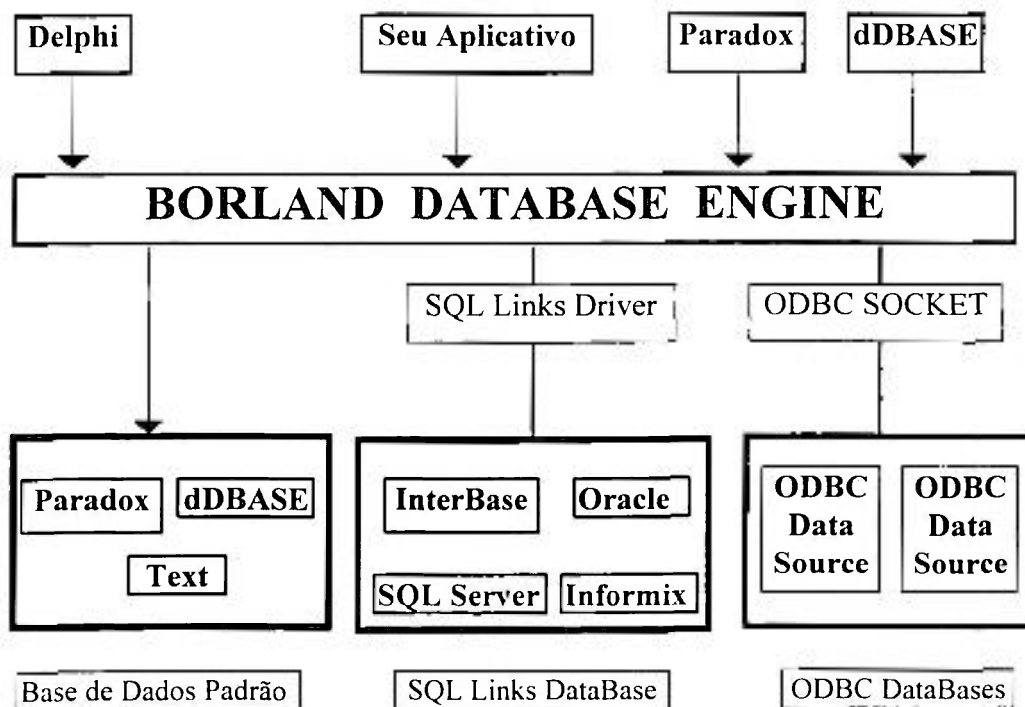


Figura 7.1 - Acesso à base de dados utilizando o “DataBase Engine”.

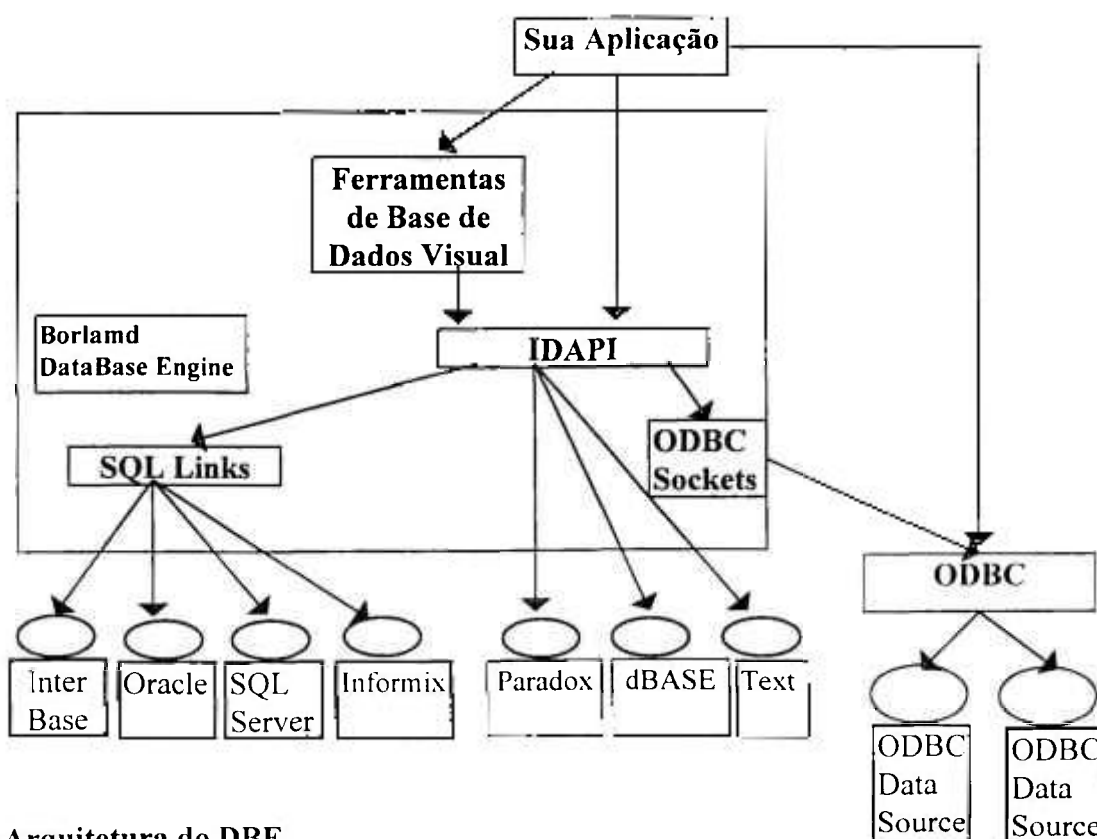


Figura 7.2 - Arquitetura do DBE

8. APÊNDICE A - DESENVOLVIMENTO DO FUZZYFTA EM DELPHI30

8.1 - A Ferramenta Delphi 3.0

Este poderoso ambiente visual de desenvolvimento utiliza o ObjetoPascal como linguagem de programação. Esta nova versão, foi desenvolvida para a plataforma Win95/NT, e é apresentado em três diferentes configurações: (i) Desktop, (ii) Development, e (iii) Client-Servidor.

Como é um ambiente para programação muito popular, possui um número vasto de publicações. Só na ClBooks (<http://www.clbooks.com>), uma das maiores empresas especializada em venda de livros via internet, existem cerca de 70 livros recentes sobre o Delphi 3.0. Grande parte destes livros, abordam desde a descrição completa sobre as características principais sobre o programa, tais como diferenças entre esta versão atual e a anterior e as melhorias implementadas pela Borland, proprietária do Delphi, como outros assuntos relevantes sobre o que é o Delphi. Passa pela descrição da interface de trabalho, Linguagem Pascal, Objeto Pascal como linguagem para Programação Orientada à Objeto - OOP, Biblioteca de Componentes Visuais, Componentes, Formulários, Banco de Dados, SQL, Cliente Servidor, OLE, Multimídia, Criação de Componentes, DLLs, e muito mais.

Desta forma, não será necessário rever assuntos bastante abordados e discutidos em número expressivo de publicações e de fácil acesso à qualquer interessado. Acho importante citar algumas coisas, que considero relevante para o bom entendimento do programa e posterior utilização para desenvolvimento de aplicativos.

Primeiro, a utilização de Orientação à objeto como um recurso valioso utilizado no Delphi 2.0, obriga ao usuário o domínio pleno de conceitos importantes sobre OOP, tais como: (i) Propriedades, (ii) Métodos e (iii) Eventos. Em segundo, é indispensável o conhecimento sobre os fundamentos em PASCAL e de estrutura de dados, abordados no item seguinte, o A.2. E, em terceiro é muito importante o conhecimento, antes e durante o uso de qualquer livro para aprendizado do Delphi, da existência de certos recursos e seu completo entendimento, e que muitas das vezes são apresentados isoladamente, em pequenos exemplos, não permitindo que o estudante veja de início todos estes recursos e o que deve nortear seu aprendizado

logo de início para o perfeito manuseio do programa. A seguir serão apresentados estes recursos para efeito de informação, podendo ser encontrado maiores detalhes no “Help” do programa.

1. “Visual Component Library (VCL) components” - possui propriedades e métodos.

Os componentes são blocos de construção de aplicações Delphi. Você pode construir uma aplicação adicionando componentes aos formulários e utilizando propriedades, métodos e eventos dos componentes.

As propriedades, métodos, e eventos que todos os componentes possuem em comum são herdados de um tipo de componente abstrato chamado de TComponent. Você deve compreender os detalhes internos do TComponent somente se estiver escrevendo um componente baseado no TComponent. Em seguida é apresentado a lista de todos os componentes no VCL:

TApplication	TDDEServerConv	TPanel
TAutoIncField	TDDEServerItem	TPopupMenu
TBatchMove	TDirectoryListBox	TPrintDialog
TBCDField	TDDrawGrid	TPrinterSetupDialog
TBevel	TDDriveComboBox	TProgressBar
TBitBtn	TEdit	TQuery
TBlobField	TField	TRadioButton
TBooleanField	TFileListBox	TRadioGroup
TButton	TFilterComboBox	TReplaceDialog
TBytesField	TFindDialog	TReport
TCheckBox	TFloatField	TRichEdit
TColorDialog	TFontDialog	TSaveDialog
TComboBox	TForm	TScreen
TCurrencyField	TGraphicField	TScrollBar
TDatabase	TGroupBox	TScrollBar
TDataModule	THeader	TSession

TDataSource	THeaderControl	TShape
TDateField	THotKey	TSmallIntField
TDateTimeField	TImage	TSpeedButton
TDBCheckBox	TImageList	TStatusBar
TDBComboBox	TIntegerField	TStoredProc
TDBCtrlGrid	TLabel	TStringField
TDBCtrlPanel	TListBox	TStringGrid
TDBEdit	TListView	TTabbedNotebook
TDBGrid	TMainMenu	TTabControl
TDBImage	TMaskEdit	TTable
TDBListBox	TMediaPlayer	TTabSet
TDBLookupCombo	TMemo	TTabSheet
TDBLookupComboBox	TMemoField	TTimeField
TDBLookupList	TMenuItem	TTable
TDBLookupListBox	TNotebook	TTimer
TDBMemo	TOLEContainer	TTrackBar
TDBNavigator	TOpenDialog	TTreeView
TDBRadioGroup	TOutline	TUpdateSQL
TDBText	TOutline	TUpDown
TDDEClientConv	TPageControl	TVarBytesField
TDDEClientItem	TPaintBox	TWordField

A maioria destes componentes são encontrados na paleta de componentes na barra de menu do programa Delphi. Estes a seguir não estão na paleta.

TApplication	TDateTimeField	TScreen
TBCDField	TField	TSession
TBlobField	TFloatField	TSmallIntField
TBooleanField	TGraphicField	TStringField
TBytesField	TIntegerField	TTimeField
TCurrencyField	TMemoField	TVarBytesField

TDateField

TMenuItem

TWordField

2. Visual Component Library (VCL) controls - possui propriedades e métodos.

“Controls” são componentes visuais: isto é, eles são componentes que você pode ver quando sua aplicação estiver executando. Todos os Controls tem propriedades em comum que especifica os atributos visuais de controles, tais como Left, Top, Height, Width, Cursor, e Hint.

As propriedades, métodos, e eventos que todos os “Controls” tem em comum são herdados de um componente abstrato do tipo chamado de TControl. Você precisa compreender os detalhes internos de TControl somente se você estiver escrevendo um componente baseado em TControl.

TBevel	TDirectoryListBox	TPageControl
TBitBtn	TDrawGrid	TPaintBox
TButton	TDriveComboBox	TPanel
TCheckBox	TEdit	TProgressBar
TComboBox	TFileListBox	TRadioButton
TDBCCheckBox	TFilterComboBox	TRadioGroup
TDBCComboBox	TForm	TRichEdit
TDBCtrGrid	TGroupBox	TScrollBar
TDBCtrlPanel	THeader	TScrollBar
TDBEdit	THeaderControl	TShape
TDBGrid	THotKey	TSpeedButton
TDBImage	TImage	TStatusBar
TDBListBox	TLabel	TStringGrid
TDBLookupCombo	TListBox	TTabbedNotebook
TDBLookupComboBox	TListView	TTabControl
TDBLookupList	TMaskEdit	TTabSet
TDBLookupListBox	TMediaPlayer	TTabSheet

TDBMemo	TMemo	TTrackBar
TDBNavigator	TNotebook	TTreeView
TDBRadioGroup	TOLEContainer	TUpDown
TDBText	TOutline	

3. Visual Component Library (VCL) objects - possui métodos.

Os objetos são os elementos fundamentais do VCL. De fato, todos os componentes e controles são baseados em objetos. Os objetos diferem dos controles podendo acessá-los somente em tempo de execução. Indiferente à maioria de componentes, objetos não aparecem na paleta de Componentes. Ao invés disso, a variável instanciada default é declarada na unit do objeto ou terá que ser declarada.

Por exemplo, a função Clipboard é declarada na unit Clipboard. Para utilizar um objeto Clipboard, adicione a unit Clipboard na cláusula uses da unit, então faça referência à variável Clipboard. Entretanto, para utilizar um objeto Tbitmap, deve-se adicionar a Graphics unit na cláusula uses da unit, então executar o seguinte código em tempo de execução para declarar uma variável instanciada.

```
var
  Bitmap1 : TBitmap;
begin
  Bitmap1 := TBitmap.Create;
end;
```

A seguir é apresentada uma lista de todos os objetos no VCL que são descendente de TObject.:

TBitmap	TGraphic	TOutlineNode
TBlobStream	TGraphicsObject	TParam
TBookmarkList	THeaderSection	TParams
TBrush	THeaderSections	TPen

TCanvas	TIcon	TPicture
TChangeLink	TIconOptions	TPrinter
TClipboard	TIndexDef	TRegistry
TCollection	TIndexDefs	TRegIniFile
TCollectionItem	TIniFile	TStatusPanell
TColumn	TList	TStatusPanels
TColumnTitle	TListColumn	TStringList
TControlScrollBar	TListItem	TStrings
TDragObject	TListItems	TTextAttributesg
TDragControlObject	TMetafile	TThread
TFieldDef	TMetafileCanvas	TTreeNode
TFieldDefs	TParaAttributes	TTreeNodes
TFont	T	

Em contribuição a estes objetos, todos componentes VCL descendem também de TObject, não diretamente.

4. Visual Component Library (VCL) windowed controls - possui propriedades, métodos e eventos.

Windowed são controls que:

- podem receber focus enquanto sua aplicação está executando.
- podem conter outros controls.
- possuem uma janela de manuseio.

Todos os windowed controls tem propriedades em comum que especifica seu atributo de focus, tais como HelpContext, TabStop, e TabOrder. Windowed controls também fornece os eventos OnEnter e OnExit.

As propriedades, métodos, e eventos que todos os windowed controls tem em comum são herdados de um tipo de componente abstrato chamado de TWinControl.

É imprescindível compreender os detalhes internos somente ao escrever componentes baseados em WinControl.

A lista seguinte é a lista de todos os windowed controls no VCL:

TBitBtn	TDirectoryListBox	TPageControl
Tbutton	TDrawGrid	TPanel
TCheckBox	TDriveComboBox	TProgressBar
TComboBox	TEdit	TRadioButton
TDBCheckBox	TFileListBox	TRadioGroup
TDBComboBox	TFilterComboBox	TRichEdit
TDBCtrlGrid	TForm	TScrollBar
TDBCtrlPanel	TGroupBox	TScrollBar
TDBEdit	THeader	TStatusBar
TDBGrid	THeaderControl	TStringGrid
TDBImage	THotKey	TTabbedNotebook
TDBListBox	TListBox	TTabControl
TDBLookupCombo	TListView	TTabSet
TDBLookupComboBox	TMaskEdit	TTabSheet
TDBLookupList	TMediaPlayer	TTrackBar
TDBLookupListBox	Tmemo	TTreeView
TDBMemo	TNotebook	TUpDown
TDBNavigator	TOleContainer	
TDBRadioGroup	TOutline	

5. Visual Component Library (VCL) nonwindowed controls.

Nonwindowed são controls que:

- não pode receber foco enquanto sua aplicação estiver executando.

- não pode conter outros controls.
- não possuem uma janela de manuseio.

As propriedades, métodos, e eventos que todos windowed controls tem em comum são herdados de um componente abstrato do tipo chamado de TGraphicControl. É necessário compreender os detalhes internos do TGraphicControl para escrever um componente baseado em TGraphicControl.

A lista a seguir é todos nonwindowed controls no VCL:

TBevel	TLabel	TSpeedButton
TDBText	TPaintBox	
TImage	TShape	

6. Classes unit.

A Classes unit contem as declarações para muitas das classes objeto base que são utilizadas pelo Delphi.

A Classes unit é automaticamente adicionada à cláusula uses toda vez que se cria um formulário.

7. System unit procedures and functions.

8. Procedures and Functions (categorical).

Graças a internet e a popularidade do Delphi 3.0. pode-se encontrar um número significativo de URL's, lista de pessoas com e-mail, sites específicos, endereços de revistas, tipo INFORMANT e outras, e muito mais, de forma a proporcionar ao interessado, todos os meios de se aprender a programar em Delphi. No mínimo, ficará muito bem informado.

No CD-ROM de instalação do Delphi3.0, vem acompanhado de alguns arquivos contendo cada um, informações que não estão disponíveis em livros tradicionais de programação Delphi. Apresenta entre outros assuntos, a estratégia de

atuação da empresa Borland para os próximos anos e três artigos importantes, sobre a nova versão do Delphi, contendo uma visão geral e completa de gerenciamento, migração de códigos e a ferramenta para Windows Cliente/Servidor RAD de alta produtividade.

8.2 - Algoritmo, Estruturas de Dados e Programação.

O algoritmo é a descrição de um conjunto de comandos que resultam numa sucessão finita de ações, quando estes comandos são atendidos.

É utilizado para a resolução de problemas em geral. Assim sendo para se elaborar um algoritmo para calcular um determinado valor, deve-se proceder de maneira simples como:

Início de Algoritmo

- . Leia dados quaisquer
- . Determine o/os valor/es desejado/s.
- . Escreva o/s resultado/os deste cálculo.

Fim de Algoritmo

O comando nestas simples instruções podem ser refinados.

Ref. Determine valor

- . Calcule os valores maior do que...
- . Determine os mais importantes...
- . Somar todos os resultados...

fim de Ref.

Estas ações de refinamento são realizadas por módulos específicos, tais como procedimentos e/ou funções. Todo módulo é constituído por uma sequência de comandos que operam sobre um conjunto de objetos, que podem ser globais ou

locais. Os objetos globais são entidades utilizadas por todos os outros módulos do algoritmo onde estiverem declaradas e os locais apenas no módulo do algoritmo onde foram declaradas inicialmente. Na forma mais completa o algoritmo poderia ficar da seguinte forma:

Início do Algoritmo

- Leia dados quaisquer
- Use módulo 1
- Use Módulo 2
- •
- •
- Use módulo n
- Resultados $\leftarrow$ módulo 1 - módulo 2 -.....- módulo n
- Escreva Resultados

fim de Algoritmo

Para estruturas de dados, podemos dividir o processo de aprendizagem em duas fases: a primeira [Harry Farrer e outros, 1986], em constantes, variáveis, expressões aritméticas, expressões lógicas, expressões literais, comando de atribuição, comandos de entrada e saída, estrutura sequencial, estrutura condicional e estrutura de repetição, e a segunda, em variáveis compostas homogêneas, variáveis compostas heterogêneas e tipos de arquivos, são itens fundamentais para programação básica em Pascal.

Em um estágio mais avançado, falta complementar esta relação com outra [Silvio Lago Pereira, 1996] e [Gerson Bronstein, 1994], se problemas específicos do tipo Impressão Concorrente, Inversão de texto e outros mais são analisados. Os itens, tais como: Ponteiros, Listas Lineares, Pilhas, Filas, Listas Ordenadas, Listas Encadeadas, Listas Generalizadas, Árvores e Indexação; são relevantes para abordagem de problemas e sua solução. Normalmente, estes itens são recomendados para um curso acadêmico de dois períodos com seis meses de duração cada um.

Do ponto de vista da solução de muitos problemas rotineiros da vida, o conhecimento de estruturas de dados é muito importante e a linguagem Pascal se encontra entre aquelas recomendadas como sendo a mais clara, de sintaxe mais simples e mais fácil de aprender.

A unidade chamada de unit é utilizada em ambientes do tipo Turbo Pascal e no Delphi2.0. Uma unit apresenta a seguinte estrutura básica:

```
unit NomeDaUnidade;           // símbolos públicos
    uses ...;
    const...;
    type...;
    var...;
    function...;
    procedure...;

implementation                // símbolos privados
    uses...;
    const...;
    var...;
    function...;
    procedure...;

begin
    ...;                       // inicialização (opcional)
end.
```

Onde, as funções retornam valores e os procedimentos não.

DESCRIÇÃO PRINCIPAL.

Ponteiros - são entidades que possuem o endereço de uma determinada região de memória. Apontam para esta determinada região da memória. E é nesta região de memória que podemos armazenar os dados. Ponteiros são declarados de forma semelhante às variáveis, porém com o símbolo ^ (chapéu) na frente do tipo. Esta declaração informa que o ponteiro <nome da variável> aponta para uma região da memória com tamanho suficiente para armazenar um dado tipo <tipo>. Da mesma forma que as variáveis, os ponteiros precisam ser inicializados no início do programa, pois possuem valor indefinido (apontam para uma região indefinida da memória). A inicialização de ponteiros é feita através do procedimento `new(p)`, onde `p` é o tipo de ponteiro. Após a execução deste procedimento, uma região de memória é reservada e `p` é apontado para ela. Para referenciarmos o conteúdo da região de memória apontada por `p`, utilizamos `p^`.

8.3 - O código FuzzyFTA.

Esta é a interface principal do aplicativo FuzzyFTA. Neste form, será editado o resultado de Probabilidade de evento topo, evento topo fuzzy com árvore completa e com cortes mínimos e os resultados para FIM, FUIM, FIMmcs e FUIMmcs.

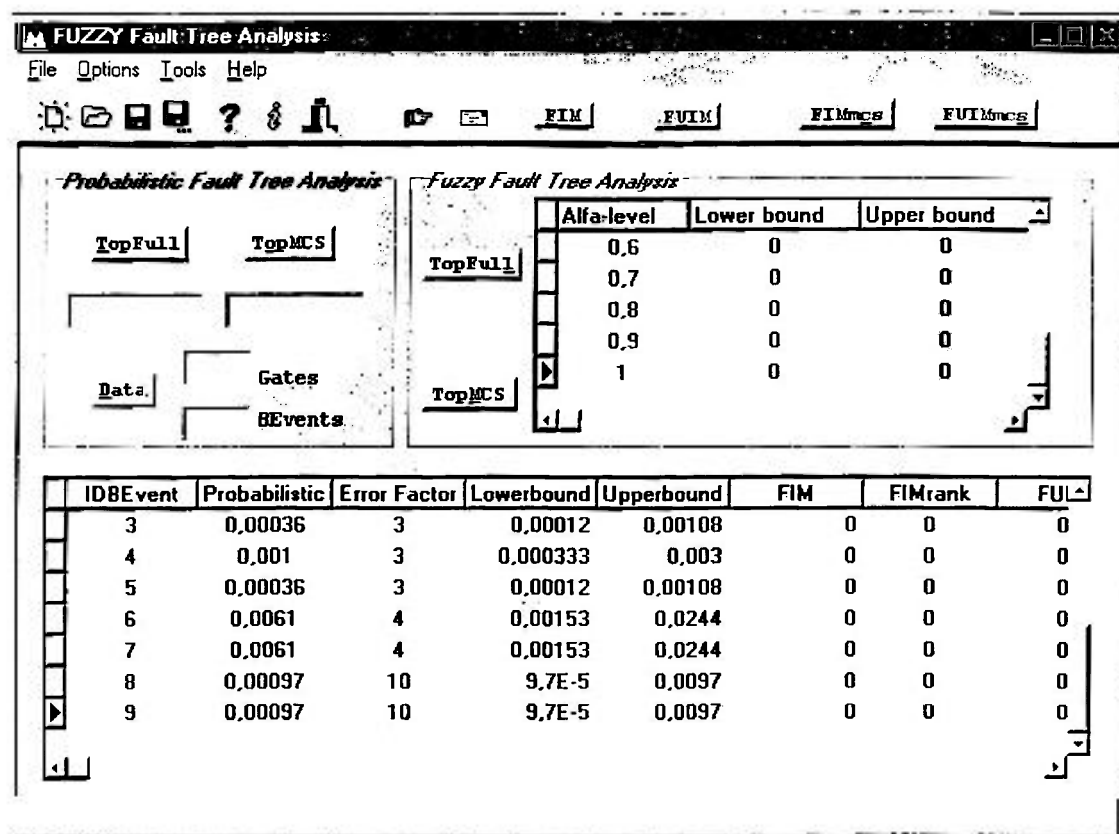


Figura 8.1 - Interface para cálculo dos valores principais

Os botões **TopFull** e **TopMCS** exibem os resultados de Probabilidade de evento Topo com árvore completa e com cortes mínimos.

O botão **Data** o número de gates e número de eventos básicos da árvore de falhas.

Os botões **TopFull** e **TopMCS** para Lower and Upper Bound Fuzzy Top Event, exhibe os valores dos resultados do cálculo fuzzy.

Os botões **FIM**, **FUIM**, **FIMmcs** e **FUIMmcs**, exibem os resultados do cálculo para as medidas de importância fuzzy e os resultados do ordenamento sem e com cortes mínimos.

O botão **FaultTree**, exhibe o formulário dois, para visualização lógica da árvore de falhas.

O botão **E-mail**, permite que se seu computador estiver conectado a internet, pode-se enviar um e-mail direto do aplicativo FuzzyFTA.

A segunda tela é um visualizador da árvore de falhas e nada pode ser modificado nesta tela, apenas verificar se os dados que foram digitados estão corretos. Uma forma de evitar que alguma alteração indevida feita por algum usuário descuidado ocorra.

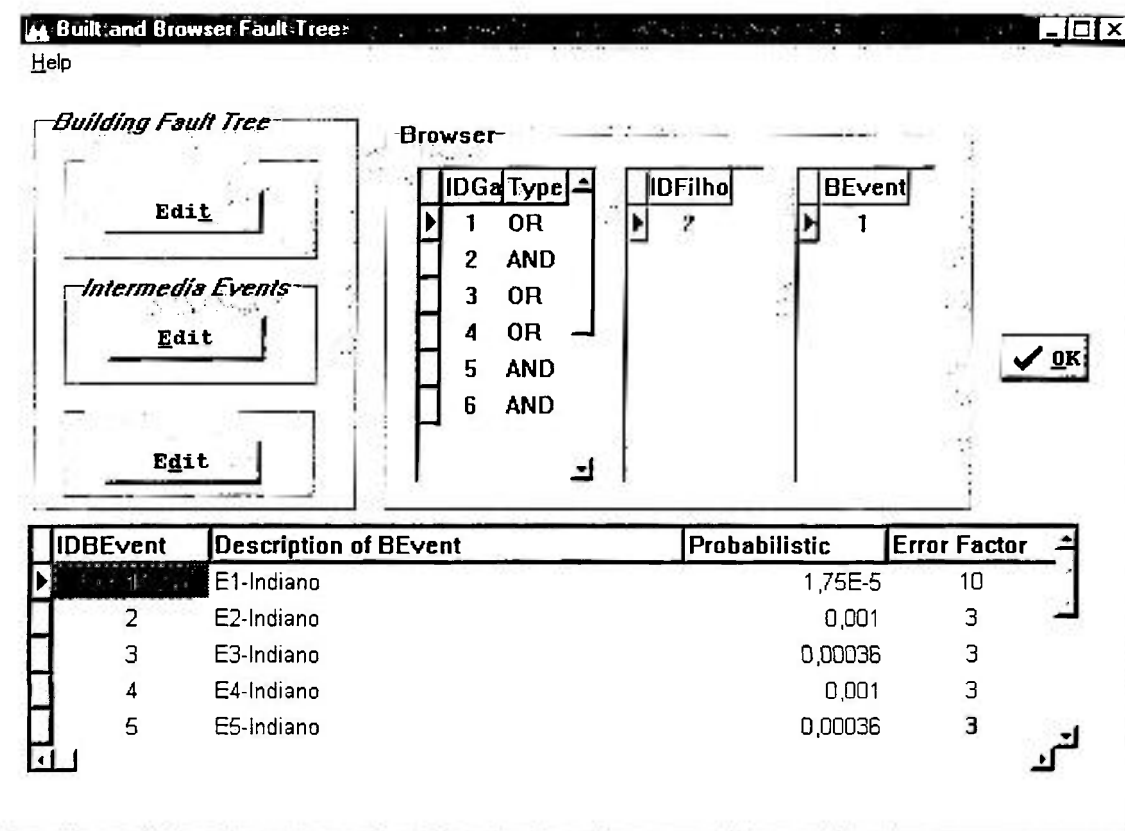


Figura 8.2 - Interface para visualização lógica da árvore de falhas

Como pode ser visto existem dois botões do lado esquerdo superior, onde cada um deles, quais sejam, Basic events, Intermediate Events, servem no primeiro para se editar os eventos básicos, o segundo editar os gates AND e OR bem como fazer a ligação de todos os gates da árvore.

Este é o terceiro form onde pode-se editar os eventos básicos, a descrição dos eventos, o valor de suas probabilidades e os valores de E factors, ou seja, fatores de erro para cada evento.

IDBEvent	Description of BEvent	Probabilistic	Error Factor
1	E1-Indiano	1,75E-5	10
2	E2-Indiano	0,001	3
3	E3-Indiano	0,00036	3
4	E4-Indiano	0,001	3
5	E5-Indiano	0,00036	3
6	E6-Indiano	0,0061	4
7	E7-Indiano	0,0061	4
8	E8-Indiano	0,00097	10
9	E9-Indiano	0,00097	10

Figura 8.3 - Interface para edição dos dados de entrada para os componentes

Este componente no canto inferior esquerdo, permite que se navegue rapidamente pela tabela quando muitos são os dados.

Setas para esquerda ou direita percorre-se os registros mais rápido se desejar. O sinal de mais adiciona mais um dado. O sinal de menos remove o marcado da tabela. O sinal tipo seta para cima insere na posição desejada. O seguinte envia o dado inserido para ser gravado. O sinal parecido com um x, cancela a gravação e o último e a liberação do dado.(refresh)

Este é o formulário quatro, onde se edita os portões (gates), e faz-se todas as ligações entre os portões AND's e OR's , bem como a ligação entre os portões e seus eventos básicos.

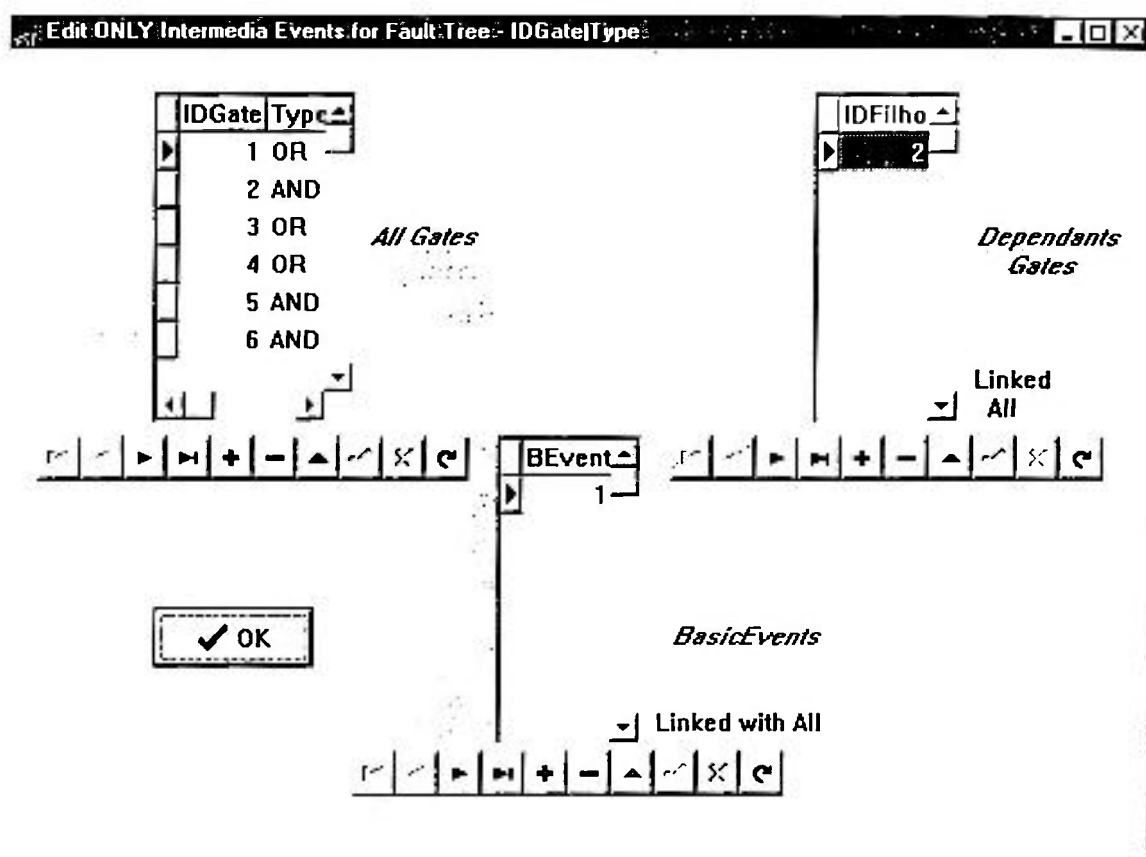


Figura 8.4 - Interface para construção lógica da árvore de falhas

É importante lembrar que primeiro deve-se definir os dados de entrada para os eventos básicos no formulário anterior. Em seguida, editar todos os "gates" da árvore, para no final fazer as ligações entre os "gates" e entre os "gates" e eventos básicos.

Para qualquer modificação, ou troca de árvore, proceda do mesmo jeito, bastando apenas inverter o processo. Primeiro remova as ligações e depois elimine os dados de entrada.

Da mesma forma que na tela anterior, estes componentes embaixo de cada tabela permitem que se navegue rapidamente entre os registros, quando muitos dados são utilizados. Para adicionar algum dado, basta apenas clicar no + e inserir o

dado e depois no 3º. botão que enviará ao banco para ser gravado. Os demais são intuitivos.

Existem ainda, mais cinco formulários que não são utilizados para qualquer cálculo. Dois são de informativos sobre o fuzzyFTA, o terceiro para escrever a mensagem de E-mail. O quarto e quinto formulário, na barra de ferramentas do 1º. formulário, são para edição dos resultados em relatórios e a visualização dos dados.

Este apêndice A, apresentou alguns conceitos sobre o Delphi3.0 acompanhado das principais fontes informações sobre a nova versão, deste ambiente de desenvolvimento bem como os fundamentos sobre estrutura de dados e algoritmos.

E, finalmente, foram apresentadas as interfaces do aplicativo FuzzyFTA, mostrando os procedimentos para sua utilização. Pode-se ver que estas interfaces, possuem um mecanismo de utilização muito amigável.

9. APÊNDICE B - RELATÓRIOS E VISUALIZAÇÃO DE DADOS

Este apêndice apresenta uma etapa importante desenvolvida neste trabalho de tese e reflete o novo conceito de “**Data Mining**”, utilizado em instituições de pesquisa e comerciais de grande porte.

Tem como objetivo extrair informações de um banco de dados, e para tal, necessita empregar técnicas inteligentes computacionais, tais como, **Redes Neurais**, **Lógica Fuzzy** e **Algoritmo Genético**, para o tratamento dos dados. Geralmente faz uso de edição dos resultados em relatórios e é fortemente auxiliado pela visualização dos dados, para efeito de diagnóstico.

Todos os resultados aqui apresentados, referem-se aos exemplos utilizados no capítulo 5. Na lâmina 1, podem ser vistos os resultados do primeiro exemplo onde os valores de probabilidade Fuzzy do Evento Topo são apresentados, com a árvore de falhas completa e os valores para a árvore analisada com os cortes mínimos. Acompanha este relatório, o gráfico de visualização destes resultados.

Na lâmina 2, outro relatório é apresentado mostrando os resultados obtidos de ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) dos componentes e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank) da contribuição de cada componente para incerteza geral do sistema.

De forma idêntica, acompanha este relatório a visualização destes resultados facilitando bastante o diagnóstico de processos. As demais lâminas referem-se, respectivamente, aos exemplos 2, 3 e 4 do capítulo 5.

É importante ressaltar que, a elaboração destes relatórios e a visualização dos dados, é feita logo em seguida a obtenção dos resultados alcançados pelo aplicativo fuzzyFTA, sem a menor necessidade de se utilizar qualquer programa externo para apresentação destes valores e visualização. Possui, ainda, o recurso de gravação em diretório local e em disquete para transporte.

Este apêndice mostrou um dos métodos mais utilizado atualmente para análise de grande massas de dados feito em modernas empresas: a de visualização de dados. Evidentemente que esta apresentação foi uma pequena demonstração de

como se pode utilizar os dados para análise, e seria impossível sem o auxílio de todo o estudo realizado neste trabalho de tese .

Esta técnica foi facilmente desenvolvida utilizando-se os recursos poderosos de componentes do DELPHI3.0.

Figura 9.1 - Lâmina 1 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 1, Sistema de Proteção do Reator, e visualização dos dados.



Fuzzy Top Event for Full and MCS FTA for Alfa-Levels

Alfa-Level	LowerBoundFull	UpperBoundFull	LowerBoundMCS	UpperBoundMCS
0	2,18E-6	0,000277	0,000335	0,00345
0,1	4,01E-6	0,000246	0,000404	0,00319
0,2	5,9E-6	0,000217	0,000473	0,00294
0,3	7,84E-6	0,000188	0,000541	0,00269
0,4	9,84E-6	0,000161	0,00061	0,00244
0,5	1,19E-5	0,000135	0,000679	0,00219
0,6	1,4E-5	0,00011	0,000748	0,00195
0,7	1,62E-5	8,69E-5	0,000817	0,00172
0,8	1,84E-5	6,44E-5	0,000886	0,00148
0,9	2,07E-5	4,32E-5	0,000956	0,00125
1	2,3E-5	2,3E-5	0,00103	0,00103

VISUALIZING DATA

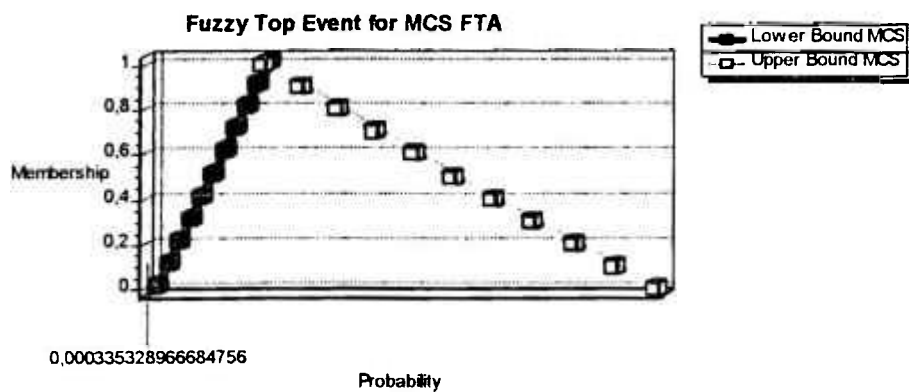


Figura 9.2 - Lâmina 2 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 1, Sistema de Proteção do Reator, e visualização de dados.

Failure probability and ranking for different components

Event no.	Failure probability (median)	Error factor	FIMrankingMCS	FUIMrankingMCS
1	1,75E-5	10	2	6
2	0,001	3	3	2
3	0,00036	3	5	4
4	0,001	3	1	1
5	0,00036	3	7	7
6	0,0061	4	6	5
7	0,0061	4	9	9
8	0,00097	10	9	9
9	0,00097	10	4	3

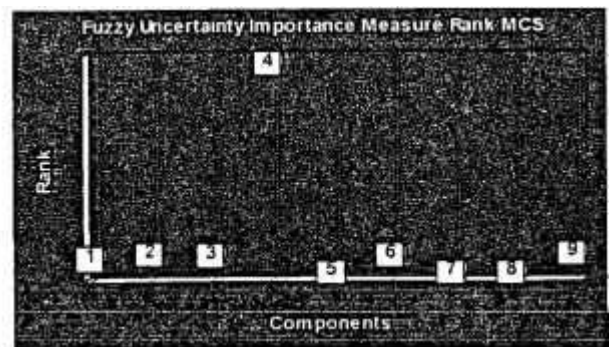
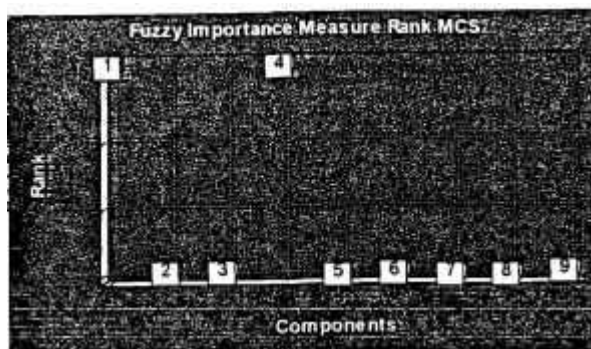


Figura 9.3 - Lâmina 3 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 2, ANGRA - 1, e visualização dos dados.



Fuzzy Top Event for Full and MCS FTA for Alfa-Levels

Alfa-Level	LowerBoundFull	UpperBoundFull	LowerBoundMCS	UpperBoundMCS
0	2,4E-10	5,54E-5	7,82E-5	0,00867
0,1	7,52E-10	3,96E-5	0,000149	0,00782
0,2	1,82E-9	2,75E-5	0,00022	0,00698
0,3	3,76E-9	1,84E-5	0,000291	0,00616
0,4	6,93E-9	1,17E-5	0,000362	0,00536
0,5	1,18E-8	7,09E-6	0,000434	0,00456
0,6	1,88E-8	3,98E-6	0,000506	0,00378
0,7	2,86E-8	2,02E-6	0,000578	0,00302
0,8	4,17E-8	8,96E-7	0,00065	0,00226
0,9	5,9E-8	3,22E-7	0,000723	0,00152
1	8,11E-8	8,11E-8	0,000796	0,000796

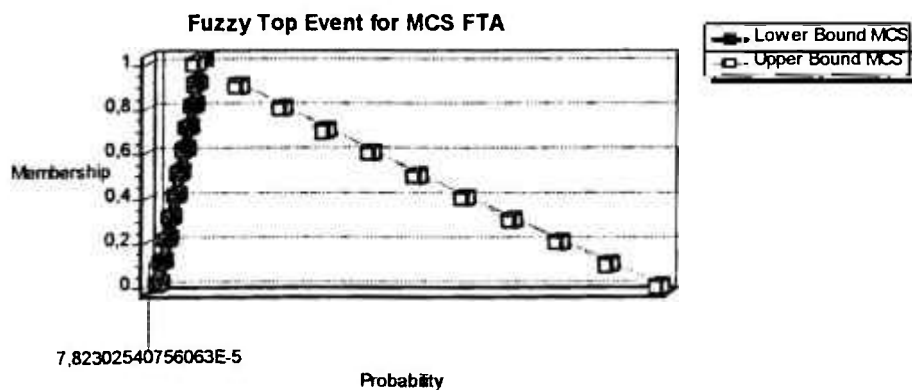


Figura 9.4 - Lâmina 4 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 2, ANGRA - 1, e visualização de dados.

Failure probability and ranking for different components

Event no.	Failure probability (median)	Error factor	FIMrankingMCS	FUIMrankingMCS
1	0,003784	3	20	10
2	0,003784	3	19	20
3	0,003784	3	18	19
4	0,003784	3	21	15
5	4,3E-5	10	16	12
6	4,5E-5	10	15	13
7	4,5E-5	10	3	3
8	4,5E-5	10	6	5
9	4,5E-5	10	10	11
10	4,5E-5	10	25	25
11	6,45E-6	10	14	23
12	6,45E-6	10	12	16

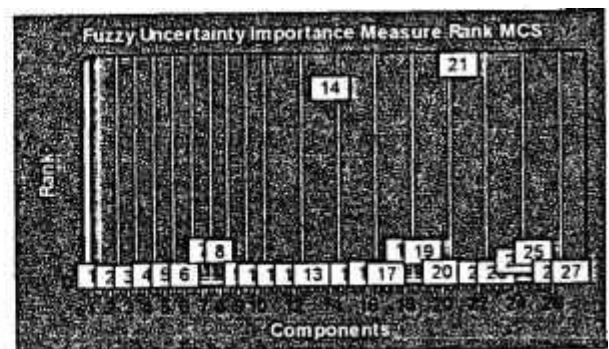
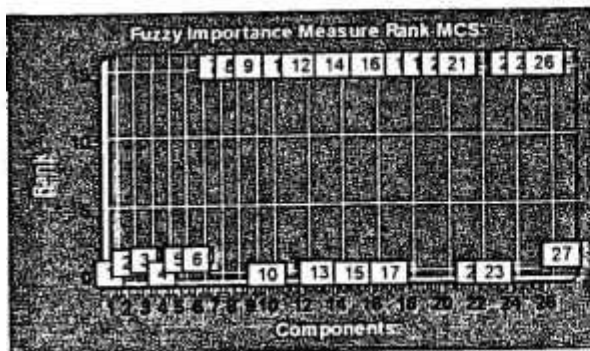


Figura 9.5 - continua...

Event no.	Failure probability (median)	Error factor	FIMrankingMCS	FUIMrankingMCS
13	6,45E-6	10	22	24
14	0,00036765	10	2	2
15	0,0008745	10	23	17
16	0,0008745	10	11	14
17	0,0008745	10	27	27
18	0,0001822425	10	5	4
19	0,0001822425	10	7	6
20	0,0001822425	10	9	9
21	0,000411015	10	1	1
22	0,001485	3	24	21
23	0,001485	3	27	27
24	0,000165	10	8	8
25	0,0315	5	4	7

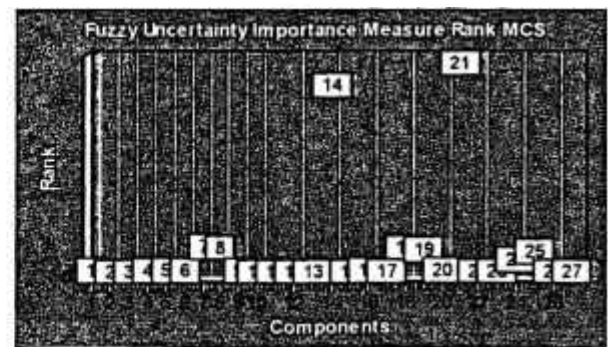


Figura 9.6 - continuação.

Event no.	Failure probability (median)	Error factor	FIMrankingMCS	FUIMrankingMCS
26	1,08E-7	10	13	22
27	6,45E-6	10	17	18

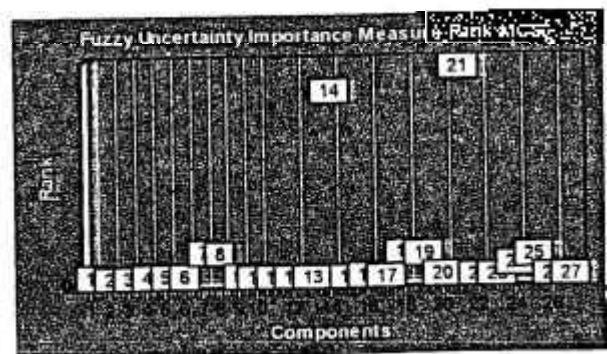
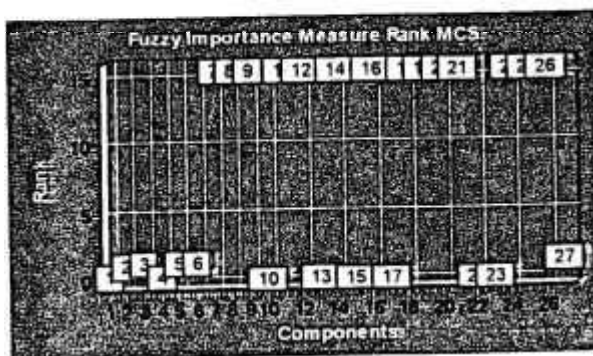


Figura 9.7 - Lâmina 5 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 3, SANDIA, e visualização dos dados.

Fuzzy Top Event for Full and MCS FTA for Alfa-Levels

Alfa-Level	LowerBoundFull	UpperBoundFull	LowerBoundMCS	UpperBoundMCS
0	1,31E-13	2,37E-8	4,03E-9	1E-5
0,1	5,99E-13	1,81E-8	1,01E-8	8,35E-6
0,2	1,57E-12	1,34E-8	1,86E-8	6,84E-6
0,3	3,23E-12	9,57E-9	2,93E-8	5,48E-6
0,4	5,73E-12	6,58E-9	4,24E-8	4,28E-6
0,5	9,25E-12	4,28E-9	5,79E-8	3,22E-6
0,6	1,4E-11	2,6E-9	7,56E-8	2,31E-6
0,7	2E-11	1,42E-9	9,57E-8	1,55E-6
0,8	2,76E-11	6,68E-10	1,18E-7	9,41E-7
0,9	3,69E-11	2,41E-10	1,43E-7	4,81E-7
1	4,81E-11	4,81E-11	1,7E-7	1,7E-7

VISUALIZING DATA

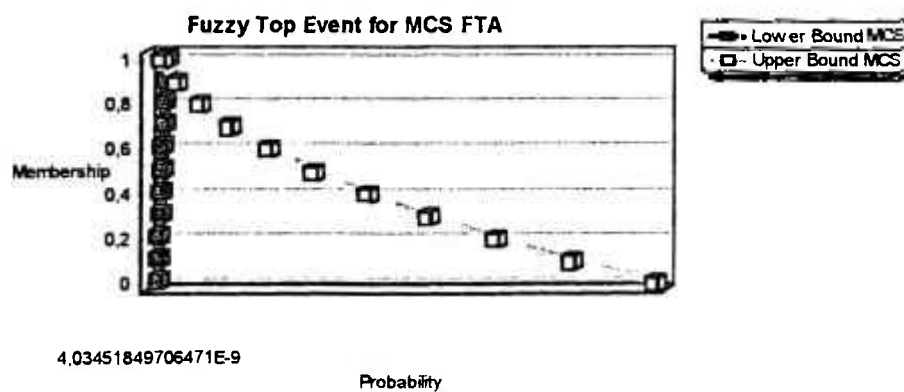


Figura 9.8 - Lâmina 6 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 3, SANDIA, e visualização de dados.

Failure probability and ranking for different components

Event no.	Failure probability (median)	Error factor	FIMrankingMCS	FUIMrankingMCS
1	0,00035	10	2	2
2	0,00035	10	3	3
3	0,0001	10	1	1
4	0,001	3	4	4
5	5E-7	10	5	5
6	3.8E-5	10	8	8
7	0.1	5	8	8
8	5E-6	10	6	8

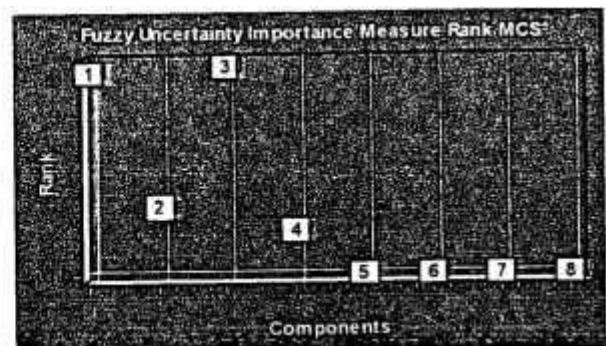
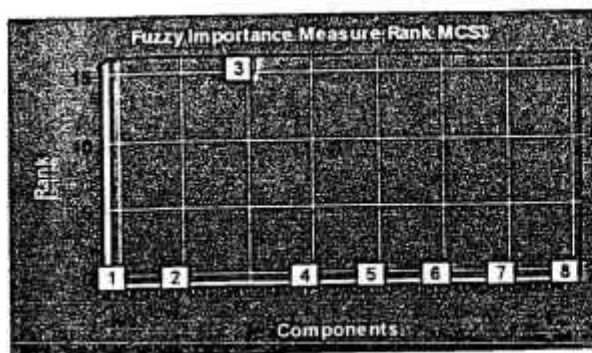


Figura 9.9 - Lâmina 7 com Relatório de dados contendo os valores sobre o evento topo fuzzy com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o exemplo 4, IRRAS, e visualização dos dados.

Fuzzy Top Event for Full and MCS FTA for Alfa-Levels

Alfa-Level	LowerBoundFull	UpperBoundFull	LowerBoundMCS	UpperBoundMCS
0	3,95E-7	0,00934	2,42E-5	0,0187
0,1	1,09E-6	0,00711	4,77E-5	0,0156
0,2	2,35E-6	0,00528	7,92E-5	0,0128
0,3	4,33E-6	0,00381	0,000119	0,0103
0,4	7,22E-6	0,00265	0,000166	0,0081
0,5	1,12E-5	0,00177	0,000222	0,0062
0,6	1,65E-5	0,00111	0,000287	0,00458
0,7	2,32E-5	0,000652	0,00036	0,00322
0,8	3,16E-5	0,000344	0,000441	0,00212
0,9	4,19E-5	0,000156	0,000531	0,00126
1	5,44E-5	5,44E-5	0,00063	0,00063

VISUALIZING DATA

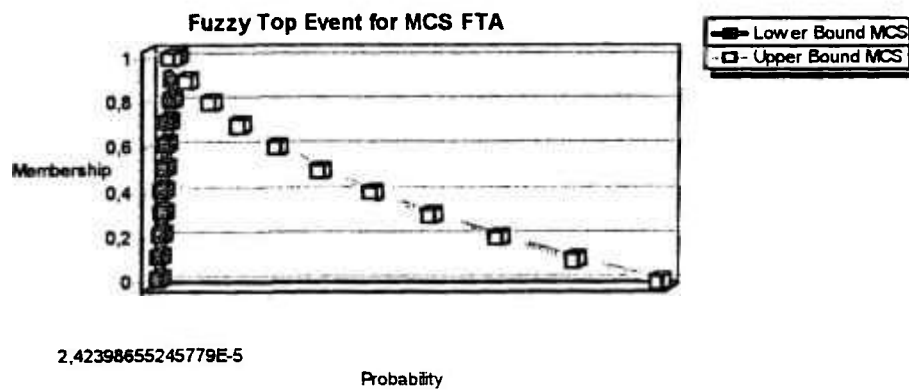
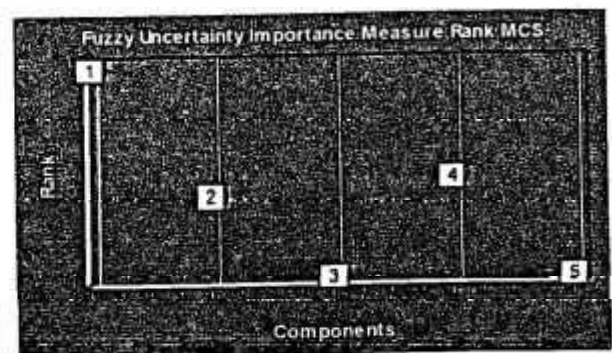
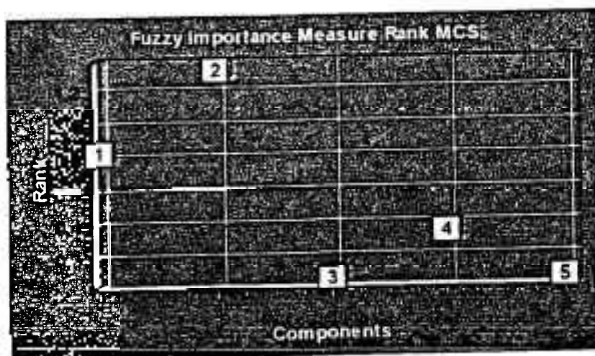


Figura 9.10 - Lâmina 8 com Relatório de dados contendo os valores sobre a ordenação das medidas de importância fuzzy (FIMrank) para os componentes, e os valores de ordenação das medidas de importância de incerteza fuzzy (FUIMrank), para análise com a árvore completa e com cortes mínimos (MCS) para o ex. 4, IRRAS, e visualização de dados.

Failure probability and ranking for different components

Event no.	Failure probability (median)	Error factor	FIMrankingMCS	FUIMrankingMCS
1	0,01	5	2	1
2	0,02	5	1	3
3	0,03	5	5	5
4	0,04	5	3	2
5	0,05	5	5	5



10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] SINGH, C., "A Cut Set Method for Reliability Evaluation of Systems Having s-Dependent Components", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 5, Dec. 1980.
- [02] LOCKS, M. O., "Recursive Disjoint Products, Inclusion-Exclusion, and Min-Cut Approximations", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 5, Dec. 1980.
- [03] INAGAKI, T., "Probabilistic Evaluation of Prime Implicants and Top-Events for Non-Coherent Systems", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 5, Dec. 1980.
- [04] CHU, T. L., "Methods for Probabilistic Analysis of Noncoherent Fault Trees", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 5, Dec. 1980.
- [05] CARGAL, J. M., "An Alternative Fault Tree Algebra", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 3, Aug. 1980.
- [06] RAI, S., "On Complementation of Pathsets and Cutsets", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 2, Jun. 1980.
- [07] ARBOR, A., "Decomposition Methods for Fault Tree Analysis", *IEEE Transactions Reliability*, v. r-29, n. 2, Jun. 1980.
- [08] LOCKS, M. O., "Correspondence. Fault Trees, Prime Implications, and Noncoherence", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 2, Jun. 1980.
Author Reply #1 - Elizabeth Iyabo Ogunbiyi, University of Ife, Ile-Ife.
Author Reply #2 - H. Kumamoto, Kyoto University, Kyoto and Ernest J. Henley, University of Houston.
Rebuttal - Mitchell O. Locks.

- [09] Nanda, N. K., "Application of a Boolean Identity for Fault Trees", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 1, Apr. 1980.
- [10] LOCKS, M. O., "The Fail-Safe Feature of the Lapp & Powers Fault Tree", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n. 1, Apr. 1980.
- [11] ANDOW, P. K., "Difficulties in Fault Tree Synthesis for Process Plant", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-29, n.1, Apr. 1980.
- [12] LOCKS, M. O., "Modularizing, Minimizing, and Interpreting the K&H Fault-Tree", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-30, n. 5, Dec. 1981.
- [13] FINNICUM, D. J. and RZASA, P. W., 1983, "A Lisp Based Algorithm For Cut Set Generation Using Boolean Reduction", *Combustion Engineering, Inc.*
- [14] WEISBIN. C. R., SAUSSURE, G. de, "et al", 1987, "Minimal Cut Set Methodology for Artificial Intelligence Applications".
- [15] GUTH, M. A. S., 1987, "Incorporating Fuzzy Data and Logical Relations In The Design of Expert Systems for Nuclear Reactors".
- [16] DOURANDISH. R. and FROGNER B., 1989, "Use of an Advanced Expert System Tool For Fault tree Analysis In Nuclear Power Plants", *IEEE*.
- [17] SHIER, D. R., "Clemson Algorithms for Generating Minimal Cutsets by Inversion" *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-34, n. 4, Oct. 1985
- [18] JASMON, G. B., "Cutset Analysis of Networks Using Basic Minimal Paths and Network Decomposition", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-34, n. 4, Oct. 1985

- [19] WILSON, J. M., "Modularizing and Minimizing Fault Trees", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-34, n.4, Oct. 1985.
- [20] STECHER, K., "Evaluation of Large Fault Trees with Repeated Events Using an Efficient Bottom-Up Algorithm", *IEEE Transactions on Reliability*, v. r-35, n. 1, Apr. 1986
- [21] FEO, T., 1986, "Program for the Analysis of Fault Trees", *IEEE* 1986.
- [22] HINE-PATTERSON, F. A., 1989, "Direct Evaluation of Fault Tree Using Object-Oriented Programming Techniques", *IEEE*.
- [23] KENARANGUI, R., 1991, "Event Tree Analysis by Fuzzy Probability", *IEEE*.
- [24] ULIERU, M., 1993, "Processing Fault Tree By Approximate Reasoning in Solving the Technical Diagnostic Problem".
- [25] ULIERU, M., 1994, "Diagnosis By Approximate Reasoning on Dynamic Fuzzy Fault Trees", *IEEE*, 1994.
- [26] WEBER, D. P., 1994, "Fuzzy Fault Tree Analysis", *IEEE*.
- [27] FUJINO, T., 1994, "New Gate Operations of Fuzzy Fault Tree Analysis", *IEEE*.
- [28] VATN, J., "Finding Minimal Cut Sets in a Fault Tree", *Reliability Engineering and System Safety*, v. 36, pp. 59-62, 1992.
- [29] COUDERT, O., MALMAISON, R. and MADRE, J. C., "MetaPrime: An Interactive Fault Tree Analyzer", *IEEE Transactions on Reliability*, v. 43, n. 1, Mar. 1994 .

- [30] ELLIOT, M. S., "Computer-Assisted Fault Tree Construction Using A Knowledge- Based Approach", *IEEE Transactions on Reliability*, v. 43, n. 1, Mar. 1994 .
- [31] PAGE, V. B., "Standard Deviations As an Alternative to Fuzziness in Fault Tree Models", *IEEE Transactions on Reliability*, v. 43, n. 3, Sep.1994.
- [32] EBECKEN, N. F. F. and GEYMAYR, J. A. B., "Fault Tree Analysis: A Knowledge-Engineering Approach", *IEEE Transactions on Reliability*, v. 44, n. 1, Mar. 1995.
- [33] HENNINGS, W., "Programs for Fast Analysis of Large Fault Tree with Replicated & Negated Gates", *IEEE Transactions on Reliability*, v. 44, n. 3, Sep. 1995.
- [34] HEGER, A. S., BHAT, J. K., STACK, D. W., "et al", "Calculating Exact Top- Event Probabilities Using Σ II-Patrec", *IEEE Transactions on Reliability*, v. 44, n. 4, Dec. 1995.
- [35] SINGER, D., "A Fuzzy Set Approach to Fault Tree and Reliability Analysis", *Fuzzy Sets and Systems*, n. 34, pp. 145-155, 1990.
- [36] FORTEMPS, P., ROUBENS, M., "Ranking and Defuzzification Methods Based on Area Compensation", *Fuzzy Sets and Systems*, v. 82, pp. 319-330, 1996.
- [37] SURESH, P. V., BABAR, A. K., and RAJ, V. Venkat, "Uncertainty in fault Tree Analysis: A fuzzy Approach", *Fuzzy Sets and Systems*, v. 83, pp. 135-141, 1996.

- [38] ROBERTS, N. H. et al, Jan. 1981, *Fault Tree HandBook*. Systems and Reliability Research Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C. 20555.
- [39] *Use of Expert Systems in Nuclear Safety*, Report of a Technical Committee Meeting Organized by the International Atomic Energy Agency and Held in Vienna, pp. 17-21 Oct. 1988. IAEA-TECDOC-542.
- [40] *International Exchange on Nuclear Safety Related Expert Systems: The Role of Software Verification and Validation. Development of Safety Related Expert Systems. Final Report of a co-ordinated Research Programme 1991-1994*. Jan 1996. IAEA-TECDOC-856.
- [41] VANHORN, R. L., RUSSELL, K. D., and SKINNEER, N. L. *Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE)*, Version 5.0. Integrated Reliability and Risk Analysis Sytem - IRRAS . NUREG/CR - 6116, EGG - 2716. Idaho National Engineering Laboratory, Dec. 1993.
- [42] WEBER, D. P., 1994, *Fuzzy Weibull for Risk Analysis*, Proceedings Annual Reliability and Mantainability Symposium.
- [43] "From Boolean Probabilistic to Fuzzy Possibilistic Fault Tree Processing in Diagnostic Decision Making". EUFIT' 93 - *First European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies*. Aachen, Sep. 7 - 10, 1993.
- [44] GUTH, M. A. S., "Uncertainty Analysis of Rule-Based Expert Systems with Dempster-Shafer Mass Assignments". *International Journal of Intelligent Systems*, v. 3, pp. 123-139, 1988.

- [45] JACKSON, P. S., HOCKENBURY, R. W. and YEATER, M. L., "Uncertainty Analysis of System Reliability And Availability Assessment", *Nuclear Engineering and Design* 68, pp. 5 - 29, 1981.
- [46] TANAKA, H., FAN, L. T., LAI, F. S., et al, "Fault Tree Analysis by Fuzzy Probability", *IEEE Transactions Reliability*, v. 32 , pp. 453-457, 1983.
- [47] CANTU, M. , 1996, *Dominando o DELPHI 3.0 - A Bíblia*, para Windows 95/NT.
- [48] TODD, B., KELLEN, V. with NOVAK, R., et al, 1996, *DELPHI 2.0 - A Developer's Guide*.
- [49] TERANO, T., ASAI, K., SUGENO, M., *Fuzzy Systems Theory and Its Applications*. Academic Press , Inc., 1991.
- [50] VELASCO, M., *Ementa de Lógica Fuzzy, Curso de Introdução à Fuzzy Set Theory*, PUC/RJ, 1995.
- [51] KRUSE, R., GEBHARDT, J. and KLAWONN, F., *Foundations of FUZZY Systems*. University of Braunschweig. Germany, JOHN WILEY & SONS, 1994.
- [52] SUNDARARAJAN, C. R., *Guide To Reliability Engineering*, Data. Analysis. Applications. Implementation. and Management. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [53] McCORMICK, N. J., *Reliability and Risk Analysis*, Methods and Nuclear Power Applications. Department of Nuclear Engineering, University of Washington. Seattle, Washington, 1981.

- [54] LEWIS, E. E., *Introduction to Reliability Engineering*, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, 1987.
- [55] GULATI, R., DUGAN, J. B., 1997, "A modular approach for analyzing static & dynamic fault-trees". In: *Proceedings on Annual Reliability and Maintainability Symposium*.
- [56] COOPER, J. A., FERSON, S., 1996, *Hybrid Processing of Stochastic and Subjective Uncertainty Data. Risk Analysis*, v. 16, n. 6, 1996.
- [57] LIANG, G. and WANG, M. J., 1993, "Fuzzy Fault-Tree Analysis Using Failure Possibility", *Microelectronic Reliability*, v. 33, n. 4, pp. 583-597.
- [58] CHEN, S., 1994, "Fuzzy System Reliability Analysis using Fuzzy Number Arithmetic Operations", *Fuzzy Stes and Systems*, v. 64, pp. 31-38.
- [59] FARRER, H., et al, 1986, *Pascal Estruturado*, 2 ed. Série Programação Estruturada de Computadores. Editora LTC - Livros Técnicos e Científicos.
- [60] PEREIRA, S. do L., 1996, *Estrutura de Dados Fundamentais - Conceitos e Aplicações*. Editora Érica Ltda.
- [61] BRONSTEIN, G., 1994, *Pascal*, 1ª. ed., Núcleo de Computação Eletrônica. UFRJ.
- [62] TENEBBAUM, A. M. and AUGENSTEIN, M. J., 1986. *Data Structures using Pascal*. 2 ed.. Prentice Hall International, INC.
- [63] BARDOSSY, A., DUCKSTEIN, L., 1995, *Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems*, CRC Press.

[64] LAPA, C. M. F., 1996, *Análise da Confiabilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar de Angra-I Considerando Falhas de Causa Comum pelo Modelo das Letras Gregas Múltiplas*. M.Sc. dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ.

[65] LAPA, C. M. F., 1997, “Estudo da Importância e Sensibilidade dos Parametros Utilizados na Análise da Confiabilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar de Angra-I”. In: XI ENFIR – Encontro Nacional de Física de Reatores, Poços de Caldas, Brasil, Agosto – 1997.

[66] COHN, M., et al, 1996, *Database Developer's Guide with C++ 5.*, 1ª. Ed.
SAMS Publishing, Borland Press.

[67] MILLER, T., POWELL, D., et al, 1997, *Using DELPHI 3, Special Edition*, QUE. ISBN: 0-7897-1118-4.