

CONFIABILIDADE DOS GERADORES DIESEL DE EMERGÊNCIA DE UMA  
CENTRAL NUCLEAR PWR DE QUATRO “LOOPS” SOB ENVELHECIMENTO E  
COM REPARO PERFEITO POR VARIÁVEIS SUPLEMENTARES

Ioná Maghali Santos de Oliveira

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

Aprovada por:

---

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

---

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D

---

Prof. Marcos Oliveira de Pinho, D.Sc.

---

Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2007

OLIVEIRA, IONÁ MAGHALI SANTOS DE  
Confabilidade dos Geradores Diesel de  
Emergência de uma Central Nuclear PWR de  
Quatro “Loops” sob Envelhecimento e com  
Reparo Perfeito por Variáveis Suplementares  
[Rio de Janeiro] 2007.

XV, 100 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Nuclear, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, COPPE

1. Confabilidade
2. Geradores Diesel de Emergência
3. Envelhecimento
4. Reparo Perfeito
5. Variáveis Suplementares

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha mãe Enecir,  
com todo o meu amor e carinho,  
dedico este trabalho.

“Só se pode alcançar um grande êxito  
quando nos mantemos fiéis  
a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por permanecer sempre ao meu lado, durante toda a minha caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, por toda a amizade, por todo o carinho, por toda a confiança, por todo o apoio e por todas as oportunidades.

Ao Prof. Marcos Oliveira de Pinho, pelo fundamental apoio, pela paciência e pelo carinho durante a realização deste trabalho e por ter aceitado participar da minha banca.

Ao Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, pelas observações, pelas sugestões, pelo convívio enriquecedor ao longo de todo o trabalho e por ter aceitado participar da minha banca.

Ao Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, pela atenção, pela paciência, pela disponibilidade, pelo sempre constante bom humor, pelas grandes idéias e por ter aceitado participar da minha banca.

À Eletrobrás Termonuclear S.A. - ELETRONUCLEAR, especialmente aos Srs. José Manuel Diaz Francisco e ao Eng<sup>o</sup> Cláudio Queiroz Mundim, pelo suporte técnico e bibliográfico.

Aos professores, alunos e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear, em especial à Jô, à Tânia, ao Reginaldo e ao Rodrigo, por toda a ajuda e companheirismo.

Aos amigos: Érica Cupertino, Flavia Vieira, Vivian Borges, Vinícius Damaso, Maurício Sant'ana, Laís Aguiar, Elisabeth Carvalho, Clarindo Almeida Lima e a todos os amigos e colegas que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Eduardo, pelo incentivo, pelo apoio, pelo companheirismo e por todas as sugestões.

À minha querida avó Maria do Carmo (Vovó Carminha), que infelizmente não pôde presenciar a mais esta conquista.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CONFIABILIDADE DOS GERADORES DIESEL DE EMERGÊNCIA DE UMA  
CENTRAL NUCLEAR PWR DE QUATRO “LOOPS” SOB ENVELHECIMENTO  
E COM REPARO PERFEITO POR VARIÁVEIS SUPLEMENTARES

Ioná Maghali Santos de Oliveira

Março/2007

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise da confiabilidade dos geradores diesel de emergência de uma Central Nuclear PWR de quatro “loops”, considerando-se as hipóteses de envelhecimento e de reparo perfeito, pela utilização do método das Variáveis Suplementares. Para esta análise, toma-se como referência uma usina nova, com apenas seis anos de operação comercial, e, dados como taxas de falha, foram obtidos de uma outra usina, de mesmo tipo, porém, já em fase de envelhecimento. Os dados de reparo foram obtidos das Especificações Técnicas desses geradores. Várias idades são atribuídas a esses equipamentos permitindo o cálculo das probabilidades de falha e das disponibilidades dos mesmos de acordo com as idades. Os resultados desta análise possibilitam considerar estratégias de manutenção distintas e otimizadas, visando uma melhor avaliação na aceitação dessas estratégias para uma eventual extensão da vida útil desses equipamentos. Um novo método numérico foi desenvolvido para resolver o sistema de equações diferenciais tornando a solução do sistema mais rápida e eficiente.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EMERGENCY DIESEL GENERATORS RELIABILITY OF A FOUR “LOOP”  
PWR POWER PLANT UNDER AGING AND WITH PERFECT REPAIR BY  
SUPPLEMENTARY VARIABLES

Ioná Maghali Santos de Oliveira

March/2007

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

The purpose of this work is to realize a reliability analysis of the emergency diesel generators of a four loop PWR Nuclear Power Plant, considering the hypothesis of aging and perfect repair, by using the Supplementary Variables method. In order to perform such analyses it is taken for reference a new power plant that has been commercially operating for only six years. Failure rates were taken from a similar power plant, already under aging, while repair data were taken from the Technical Specifications. Several ages were attributed to these generators, allowing the calculus of the failure probability, as well as their availability according to each regarded age. The results of such analysis make it possible to consider distinct and optimized maintenance strategies, aiming a better evaluation in the acceptance of these strategies to an eventual extension of useful lifetime of these equipments. A new numerical method was developed in order to solve the differential equations systems, making the solving of the system faster and more efficient.

# Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Histórico sobre Confiabilidade.....	2
1.3. Revisão Bibliográfica.....	3
1.4. Importância.....	5
1.5. Objetivo e Motivação .....	6
1.6. Estrutura da Dissertação .....	8
<b>Capítulo 2 – Conceitos Básicos sobre Confiabilidade</b> .....	9
2.1. Introdução.....	9
2.2. Confiabilidade – $R(t)$ .....	9
2.3. Taxa de Falha – $\lambda(t)$ .....	9
2.4. Sistema Reparável .....	10
2.5. Sistema Não Reparável .....	11
2.6. Reparo Mínimo ( <i>As Bad as Old</i> ).....	11
2.7. Reparo Perfeito ( <i>As Good as New</i> ) .....	11
2.8. Taxa de Reparo – $\mu(t)$ .....	11
2.9. Disponibilidade – $A(t)$ .....	11
2.10. Modelos de Envelhecimento .....	12
2.11. Processos Markovianos.....	13
2.12. Processos de Renovação .....	15
2.13. Conclusão.....	16
<b>Capítulo 3 – Equações de Variáveis Suplementares</b> .....	17
3.1. Introdução.....	17
3.2. Modelagem Biológica .....	18
3.3. Variáveis Suplementares .....	21
3.4. Conceitos Básicos sobre Equações Diferenciais de 1ª Ordem.....	23
3.5. Solução Numérica .....	27
3.6. Conclusão .....	31



<b>Capítulo 4 – Sistema Elétrico de Angra 2</b> .....	33
4.1. Introdução.....	33
4.2. Função do Sistema .....	33
4.3. Descrição do Sistema .....	34
4.3.1. Sistema Elétrico – Visão Geral.....	34
4.3.1.1. Rede Externa Principal de 525 KV.....	38
4.3.1.2. Gerador Principal MK .....	38
4.3.1.3. Rede Externa Reserva de 138 KV .....	38
4.3.1.4. Sistema Elétrico Auxiliar.....	38
4.3.1.4.1. Sistema de Suprimento Elétrico Normal .....	39
4.3.1.4.2. Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1.....	42
4.3.1.4.3. Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2.....	47
4.3.1.5. Transferência de Alimentação entre as Redes Externas .....	50
4.3.1.6. Modo de Suprimento de Emergência .....	52
4.3.1.6.1. Estágios de Partida dos Geradores Diesel .....	54
4.3.1.6.2. Estágios de Carga dos Geradores Diesel - DLS .....	55
4.3.1.6.3. Estágios de Carga dos Geradores Diesel - EDLS.....	56
4.4. Conclusão .....	57
<b>Capítulo 5 – Modelagem dos Geradores Diesel de Emergência</b> .....	58
5.1. Introdução.....	58
5.2. Considerações sobre o Modelo Proposto .....	59
5.3. Conclusão .....	68
<b>Capítulo 6 – Resultados</b> .....	69
6.1. Introdução.....	69
6.2. Primeira Simulação .....	72
6.3. Segunda Simulação .....	77
6.4. Terceira Simulação.....	81
6.5. Quarta Simulação .....	83
6.6. Quinta Simulação .....	86
6.7. Sexta Simulação .....	88
6.8. Sétima Simulação.....	89
6.9. Conclusão .....	91

**Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações** ..... 93

**Referências Bibliográficas** ..... 96

## Índice de Figuras

Figura 2.1	Taxas de Falhas da Distribuição Weibull.....	12
Figura 4.1(a)	Diagrama Unifilar Simplificado – Sistema de Suprimento Elétrico Normal (SSEN).....	35
Figura 4.1(b)	Diagrama Unifilar Simplificado – Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 (SSEE 1).....	36
Figura 4.1(c)	Diagrama Unifilar Simplificado – Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 (SSEE 2).....	37
Figura 5.1	Diagrama de Transição de Estados para os Geradores Diesel de Emergência dos SSEE 1 e SSEE 2.....	61
Figura 6.2(a)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (40 anos) – 1ª Simulação.....	73
Figura 6.2(b)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (40 anos) – 1ª Simulação.....	74
Figura 6.2(c)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 1ª Simulação.....	74
Figura 6.2(d)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 1ª Simulação.....	75
Figura 6.2(e)	Curva Típica das Soluções das Equações de McKendrick.....	75
Figura 6.2(f)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1 – 1ª Simulação.....	76
Figura 6.2(g)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2 – 1ª Simulação.....	76
Figura 6.3(a)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (40 anos) – 2ª Simulação.....	78
Figura 6.3(b)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (40 anos) – 2ª Simulação.....	78
Figura 6.3(c)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 2ª Simulação.....	79
Figura 6.3(d)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 2ª Simulação.....	79

Figura 6.3(e)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1 – 2ª Simulação.....	80
Figura 6.3(f)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2 – 2ª Simulação.....	80
Figura 6.4(a)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 3ª Simulação.....	81
Figura 6.4(b)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 3ª Simulação.....	82
Figura 6.4(c)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 3ª Simulação.....	82
Figura 6.4(d)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 3ª Simulação.....	83
Figura 6.5(a)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 4ª Simulação.....	84
Figura 6.5(b)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 4ª Simulação.....	84
Figura 6.5(c)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) 4ª Simulação.....	85
Figura 6.5(d)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 4ª Simulação.....	85
Figura 6.6(a)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 5ª Simulação.....	87
Figura 6.6(b)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 5ª Simulação.....	87
Figura 6.7(a)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 6ª Simulação.....	88
Figura 6.7(b)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 6ª Simulação.....	89
Figura 6.8(a)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos) – 7ª Simulação.....	90
Figura 6.8(b)	Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos) – 7ª Simulação.....	90

## Índice de Tabelas

Tabela 4.1	Cargas Essenciais do SSEN.....	41
Tabela 4.2	Cargas Essenciais do SSEE 1.....	44
Tabela 4.3	Cargas Essenciais do SSEE 2.....	49
Tabela 5.1	Condições de Falha e Ações de Reparo para os Geradores Diesel de acordo com as Especificações Técnicas.....	60
Tabela 5.2	Representação dos Geradores Diesel e de seus Estados no Diagrama de Transição de Estados.....	62
Tabela 6.1	Taxas de Reparo Constantes x Probabilidade de Falha Estacionária....	91
Tabela 6.2	Taxas de Reparo Constantes x Disponibilidade Média.....	91

## Lista de Siglas

NRC	Nuclear Regulatory Comission
WANO	World Association for Nuclear Operators
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
SAAA	Sistema de Água de Alimentação Auxiliar
SSEE	Sistema de Suprimento de Energia Elétrica
SSEN	Sistema de Suprimento Elétrico Normal
SSEE 1	Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1
SSEE 2	Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2
JR	Sistema de Proteção do Reator (SPR)
DLS	Passos de Carregamento do Diesel 1 ( <i>Diesel Load Step</i> )
EDLS	Passos de Carregamento do Diesel 2 ( <i>Emergency Diesel Load Step</i> )
XJN	Sistema de Combustível do Diesel
XJV	Sistema de Óleo Lubrificante do Diesel
XJP	Sistema de Ar Comprimido do Diesel
XJQ	Sistema de Ar de Combustão do Diesel
XJR	Sistema de Gás de Escape do Diesel
XJG	Sistema de Refrigeração do Diesel
1XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 1
2XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 2
3XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 3
4XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 4
5XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 5
6XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 6

7XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 7
8XK/XJ	Grupo Gerador Diesel 8
RESA	Desarme Automático do Reator
TUSA	Desarme Automático da Turbina
FSAR	Final Safety Analysis Report
CFOL	Curso de Formação de Operadores Licenciáveis

# Capítulo 1

## – Introdução –

### 1.1. Considerações Iniciais

O funcionamento prolongado e eficiente de equipamentos e sistemas de um modo geral é uma exigência vital em muitos domínios. Nos serviços como a geração e distribuição de energia, ou nos serviços de transportes, por exemplo, as falhas súbitas, causadas por fatores aleatórios, devem ser entendidas e contrabalançadas a fim de que danos, não só econômicos, mas especialmente sociais, possam ser evitados.

Também nas indústrias, hoje caracterizadas pelo grande volume de produção e alta complexidade, dotadas de sofisticados sistemas de automação e controle, impõe-se, com grande acuidade, a necessidade de que sejam conhecidas e controladas as possibilidades de falhas, parciais ou globais, que possam comprometer a missão produtiva.

Tais exigências impulsionaram a criação e o desenvolvimento de um ramo da ciência denominado Teoria da Confiabilidade. Essa teoria reúne técnicas cujo propósito é calcular as probabilidades de falhas dos sistemas, tendo por escopo os métodos, os critérios e as estratégias que devem ser utilizados nas fases de concepção, projeto, desenvolvimento, operação, manutenção e distribuição, de modo a garantir-se o máximo de eficiência, segurança, economia e duração para o sistema.

Entende-se por sistema, um grupo ordenado de componentes que trabalham juntos para executar uma função específica (AMENDOLA e BUSTAMANTE, 1986). Quando qualquer desses componentes não realiza, ou realiza de maneira ineficaz, a função que lhes foi atribuída, diz-se que ocorreu uma falha. Em outras palavras, uma falha pode ser definida como a incapacidade de um sistema ou componente para desempenhar bem a função para a qual foi projetado. Para que esses efeitos indesejáveis sejam evitados, desde a fase conceitual de projeto, até o fim da vida útil do sistema, são aplicados os conceitos da Teoria da Confiabilidade (OLIVEIRA, 2005).

Fundamentalmente, a Teoria da Confiabilidade tem como objetivos principais, estabelecer as leis estatísticas das probabilidades de ocorrência de falhas em equipamentos e sistemas, bem como os métodos que permitam melhorar esses



equipamentos mediante a introdução de estratégias capazes de alterar índices quantitativos e qualitativos relativos a essas possíveis falhas, utilizando como ferramentas principais a Estatística, o conhecimento experimental das causas da falha e dos parâmetros que as caracterizam nos diversos tipos de sistemas, e, as regras e estratégias para a melhoria do desempenho dos mesmos, possibilitando a concepção de sistemas mais complexos, capazes de operar satisfatoriamente mesmo com a ocorrência de falhas em alguns de seus componentes mais críticos.

## **1.2. Histórico sobre Confiabilidade**

No início do século passado, os problemas relativos à confiabilidade eram tratados de maneira intuitiva. Uma vez projetados, os equipamentos eram testados e, quando não atendiam às expectativas de bom funcionamento, eram então, reprojitados. Tal prática, no entanto, além de dispendiosa, teve que ser abandonada a partir da década de 30, pois, com o advento da era industrial e a crescente demanda por produtos novos, complexos e caros, uma nova estratégia de análise de confiabilidade passou a ser exigida a fim de permitir a quantificação do desempenho dos produtos de modo rápido e objetivo, diminuindo a quantidade de falhas e tornando o produto competitivo no mercado.

Ainda na década de 30, tomando-se o exemplo das aeronaves, expressava-se a confiabilidade em termos de um número médio de falhas para aviões.

Já na década de 40, alguns requisitos fixavam a taxa de acidentes em um a cada 100.000 horas de voo (OLIVEIRA et al., 1987).

A partir da década de 50, a confiabilidade ganhou um novo enfoque e passou a figurar como uma ramificação da Engenharia, especialmente na Engenharia Eletrônica, onde os conceitos da confiabilidade foram bastante utilizados em função da complexidade crescente dos sistemas. Aos poucos, foi-se percebendo que era muito melhor investir no projeto de equipamentos mais confiáveis do que despende tempo e recursos com reparos e manutenções. Conceitos estatísticos foram gradativamente sendo introduzidos, possibilitando o desenvolvimento de sistemas cada vez mais complexos, capazes de operar com um número bem menor de insucessos.

Mais tarde, na década de 60, foi realizada a primeira análise detalhada dos efeitos da falha em componentes na performance de um sistema e também na segurança

de pessoas e de instalações industriais. Possibilitou-se a utilização, pela indústria nuclear, de estudos de acidentes potenciais durante a fase de projeto.

Nas décadas de 70 e 80, a indústria nuclear teve grande participação nas inovações inseridas nos métodos para a predição e análise de riscos nas indústrias. Vários tipos de indústrias, como a petroquímica, por exemplo, passaram a adotar técnicas para a modelagem preditiva da confiabilidade (LINS, 2003).

Nos dias atuais, uma nova preocupação mobiliza estudiosos da área nuclear no mundo inteiro: o problema relacionado com o envelhecimento das centrais nucleares próximas a completarem 40 anos de operação. Esse problema vem chamando a atenção dos órgãos responsáveis pelo licenciamento e pela operação das unidades, que estudam critérios para a extensão da vida útil qualificada dessas usinas. Como tudo o que diz respeito à área nuclear, onde a segurança é sempre fator prioritário, esses critérios tão almejados devem estar de acordo com todos os requisitos de segurança estipulados em projeto e relacionados não apenas a aspectos técnicos e econômicos, mas principalmente, aos aspectos da confiabilidade.

### **1.3. Revisão Bibliográfica**

A análise markoviana (LEWIS, 1994) e (SINGH e BILLINTON, 1977), permite o cálculo da confiabilidade e da disponibilidade de sistemas que estão dentro de seu período de vida útil, pois, dentro desse período, a taxa de falha do sistema é considerada constante.

A confiabilidade de sistemas que estão em fase de envelhecimento, não segue os modelos que descrevem os sistemas que estão dentro de seu período de vida útil.

Para sistemas que já entraram no período de envelhecimento, deve-se levar em consideração o aumento crescente da taxa de falha, que cresce rapidamente devido a vários fatores, destacando-se entre eles, a fadiga do material. Para esses sistemas, a análise markoviana não é adequada, pois nesse período a taxa de falha deixa de ser constante e passa a ser crescente com o tempo.

OLIVEIRA (2005) fez uma análise da confiabilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar (SAAA) da Central Nuclear de Angra 1, considerando o envelhecimento do mesmo e utilizando as hipóteses de reparo mínimo (LINS, 2003) ou tão ruim quanto velho (*as bad as old*) e reparo perfeito (LINS, 2003) ou tão bom quanto

novo (*as good as new*), utilizando dois métodos para a modelagem de sistemas sob envelhecimento, os quais são: o Método dos Estágios (BILLINTON e ALLAN, 1983) e o Método das Variáveis Suplementares (SINGH e BILLINTON, 1977), empregados na transformação de sistemas não-markovianos em sistemas markovianos. Os resultados obtidos através da utilização dos dois métodos foram comparados, aplicando-se uma taxa de falha média para a representação do período de envelhecimento.

LINS (2003) apresentou duas metodologias para o cálculo da confiabilidade de sistemas sob envelhecimento cujos modelos foram otimizados por algoritmos genéticos (GOLDBERG, 1989), baseadas na utilização do Método dos Estágios, o qual, como dito anteriormente, permite transformar sistemas não-markovianos em sistemas markovianos equivalentes. Vários testes foram realizados com diferentes distribuições de probabilidades para diferentes sistemas e os resultados obtidos com a utilização das metodologias propostas foram comparados com resultados obtidos por outras metodologias. Um dos testes consistiu no cálculo da confiabilidade de uma versão simplificada do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar (SAAA) da Central Nuclear de Angra 1.

OLIVEIRA (2001) apresentou o desenvolvimento de um método de análise da confiabilidade de sistemas sob envelhecimento e sob reparo mínimo, utilizando o Método das Variáveis Suplementares e Inversão de Laplace para reduzir o número de equações a serem resolvidas por técnicas numericamente aproximadas, utilizando o método de Integração de Gauss-Legendre, o qual, devido à sua alta velocidade computacional, executa muito rapidamente o tratamento da variável tempo. Da mesma forma que as referências anteriores, mais uma vez o Sistema de Água de Alimentação Auxiliar (SAAA) da Central Nuclear de Angra 1 foi utilizado na aplicação da metodologia proposta.

CROSSETTI (2006) aplicou as metodologias desenvolvidas por LINS (2003), realizando o cálculo da confiabilidade do Sistema Elétrico da Central Nuclear de Angra 1, considerando o envelhecimento do sistema.

SANT'ANA (2006) apresentou uma modelagem das incertezas associadas às falhas de causa comum considerando diversidade e envelhecimento, analisando sob o ponto de vista da influência desses dois fatores, a probabilidade de falha dos sistemas.

Já no âmbito da extensão da vida útil qualificada de equipamentos de centrais nucleares, SALDANHA (2003) aborda a aplicação de processos pontuais modulados à avaliação do envelhecimento. Os processos modulados tratados nesta referência servem

para descrever os tempos de falhas para um sistema reparável (RIGDON e BASU, 2000), implicando em que o sistema esteja, depois do reparo, exatamente como estava antes da falha, permitindo que o sistema seja afetado tanto pela falha como pelo reparo, sendo desta maneira, adequado para avaliar eventos que incorporem tendências no tempo ou que possuam características do processo de renovação (BEICHELT, 2006).

PINHO (2000) discute o Método das Variáveis Suplementares para o cálculo da disponibilidade de equipamentos sujeitos ao envelhecimento utilizando a hipótese de reparo perfeito. Para a modelagem do problema, foram utilizados sistemas de equações diferenciais parciais de primeira ordem, obtendo-se um teorema de existência e unicidade para sistemas de dois estados e resolvidos diversos exemplos numéricos.

#### **1.4. Importância**

A extensão da vida útil de centrais nucleares em operação comercial no mundo inteiro é, sob o ponto de vista econômico e social, uma opção viável e bastante atrativa para empresas proprietárias de usinas nucleares.

Vários fatores têm motivado os órgãos responsáveis em todo o mundo a buscarem meios de se estender o tempo de vida útil de suas usinas. Um desses fatores está diretamente relacionado com o descomissionamento das unidades, uma vez que várias delas estão chegando ao final de sua vida útil, ou seja, entraram em fase de envelhecimento. Quando uma usina nuclear termina o seu ciclo de vida e é descomissionada, a concessionária de energia elétrica que a opera não pode construir uma nova usina nuclear neste país, o que resulta em uma queda considerável em seu faturamento. Se for levado em conta que a produção diária de uma usina nuclear representa um movimento monetário que pode facilmente alcançar cifras acima de US\$ 1 milhão, o interesse dessas empresas em estender o tempo de funcionamento de suas usinas nucleares é perfeitamente explicável (OLIVEIRA, 2001).

Um segundo fator, não menos importante, é a crescente demanda por energia elétrica no mundo. No Brasil, particularmente, este fato pôde ser comprovado pela crise energética em 2001, caracterizada pela ameaça de racionamento de energia elétrica, na época, popularmente chamada de “apagão”.

Um terceiro fator está relacionado com a expansão da matriz termonuclear, que encontra-se suspensa em alguns países, e, novamente, podemos citar o Brasil como um

bom exemplo, onde existe o impasse quanto à construção da Central Nuclear de Angra 3, com diversas correntes de pensamento questionando os custos financeiros e sociais necessários para a construção de uma nova usina (OLIVEIRA, 2005).

Desta forma, tornam-se indispensáveis os estudos que possam garantir que os sistemas que compõem uma central nuclear continuem operando pelo maior tempo possível, dentro, é claro, dos parâmetros e requisitos de segurança exigidos.

### **1.5. Objetivo e Motivação**

Em dezembro de 1991, a NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) emitiu regras que descrevem como o licenciado deve estar capacitado a demonstrar que a unidade pode continuar operando por 20 anos adicionais após a expiração dos 40 anos de licença. Estas regras foram estabelecidas nos 10CFR51 (1991) requisitos de proteção ambiental, e, 10CFR54 (1995) requisitos técnicos, sendo denominadas Renovação de Licença (SALDANHA, 2003).

A extensão da vida útil de centrais nucleares é importante do ponto de vista econômico, porém a segurança, fator imprescindível, não pode ser descartada ou subestimada.

Este fato nos leva a inferir que precisamos avaliar o envelhecimento dessas unidades a fim de aumentar a vida útil e a disponibilidade das mesmas. Em função disto, como visto no item (1.3), estudos considerando fatores como envelhecimentos, reparos, entre outros, foram realizados ao longo dos anos, oferecendo resultados e informações importantes para a operação e para a manutenção destas usinas.

O presente estudo busca fornecer mais uma contribuição nesta área, através de uma análise da confiabilidade dos geradores diesel de emergência de uma central nuclear PWR típica de quatro “loops” (ou circuitos de vapor), considerando as hipóteses de envelhecimento e de reparo perfeito, pelo Método das Variáveis Suplementares.

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) – Unidade 2, ou simplesmente, Central Nuclear de Angra 2, de propriedade da Eletrobrás Termonuclear S.A. – ELETRONUCLEAR, é tomada como referência para o presente estudo, embora a descrição não se limite a este sistema.

Por tratar-se de uma usina nova, em operação comercial desde Julho de 2000 quando a unidade foi sincronizada à rede, o objetivo deste trabalho é simular as

condições de envelhecimento para os geradores diesel de emergência da central nuclear, bem como calcular as probabilidades de falha e disponibilidades desses geradores de acordo com as idades. Várias idades foram atribuídas a esses equipamentos durante o processo de obtenção dos resultados, simulando o envelhecimento.

Os históricos operacionais dos geradores diesel de Angra 2 revelam que, quando demandados, eles têm atendido às expectativas de bom funcionamento no que diz respeito aos fatores ótimos estimados pela usina, os quais são equivalentes aos estabelecidos pela WANO (*World Association for Nuclear Operators*) para centrais PWR de dois “loops”. Portanto, em função do bom desempenho desses equipamentos e do fato de estarem em operação comercial há apenas seis anos, sob o ponto de vista do envelhecimento, a estimação de uma taxa de falhas que pudesse dar suporte ao modelo desenvolvido, tornou-se dispensável devido a não evidência dessas tendências de envelhecimento. Como o objetivo deste trabalho é simular esse envelhecimento, foram adotados como dados de entrada para o parâmetro taxa de falhas dos geradores, os mesmos adotados por CROSSETTI (2006) para os geradores diesel de Angra 1, os quais encontram-se no início da segunda metade de seu período de vida útil. Vale ressaltar que os geradores diesel de Angra 1 (principalmente os GD – 1A e GD – 1B) no início de sua operação, apresentaram um alto índice de falhas, sendo do mesmo fabricante que os geradores diesel de Angra 2.

No que diz respeito a dados de reparo (taxas de manutenção), foram adotados os valores estipulados nas Especificações Técnicas (FSAR, 2005) dos equipamentos. Além disso, no âmbito dos estudos desenvolvidos no PEN (Programa de Engenharia Nuclear / COPPE) sobre sistemas sob envelhecimento, pela primeira vez, foram estipuladas taxas de reparo descontínuas, ou seja, taxas de reparo considerando duas situações distintas durante operações: dentro e fora dos requisitos das Especificações Técnicas.

Se comparados aos geradores diesel de emergência da Central Nuclear de Angra 1, os quais estão disponíveis para operação comercial desde o final de 1984, os geradores diesel de emergência de Angra 2 atualmente, estão com menos tempo de operação comercial, o que poderia levar a um possível questionamento sobre a atribuição do fator envelhecimento aos geradores de Angra 2 em lugar dos geradores de Angra 1. Essa atribuição deve-se ao fato de que, apesar das diferenças entre o presente estudo e o trabalho realizado por CROSSETTI (2006) para Angra 1, nenhum estudo semelhante a este havia sido realizado para Angra 2 até então.

Outra grande motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi a possibilidade de simular o envelhecimento de um equipamento importantíssimo sob o ponto de vista da segurança, como é o caso dos geradores diesel de emergência, determinando suas probabilidades de falhas e suas indisponibilidades de acordo com as idades a eles atribuídas, tornando possíveis tomadas de decisões e estratégias de manutenção muito mais otimizadas no presente, visando no futuro, um acréscimo na sua vida útil.

## **1.6. Estrutura da Dissertação**

O Capítulo 2 é dedicado à definição dos conceitos básicos sobre confiabilidade que serão utilizados no decorrer deste estudo, de modo a tornar mais fácil o entendimento dos capítulos subseqüentes.

O Capítulo 3 apresenta fundamentos matemáticos básicos sobre o Método das Variáveis Suplementares, bem como a teoria da modelagem de um sistema considerando a hipótese de reparo perfeito. Ainda neste capítulo, descreve-se o método numérico para a solução de equações diferenciais parciais para a modelagem das Variáveis Suplementares.

No Capítulo 4 descreve-se de uma maneira simplificada o funcionamento do Sistema Elétrico da Central Nuclear de Angra 2, e, conseqüentemente, dos geradores diesel de emergência que serão modelados.

No Capítulo 5 encontra-se a modelagem dos geradores diesel de emergência da Central Nuclear de Angra 2, utilizando-se o Método das Variáveis Suplementares.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos a partir da modelagem do sistema do capítulo anterior.

No Capítulo 7 encontram-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### – Conceitos Básicos sobre Confiabilidade –

#### 2.1. Introdução

Este capítulo é dedicado à definição dos conceitos básicos sobre confiabilidade que serão utilizados no decorrer deste estudo. A literatura sobre esse assunto é bastante abrangente e ainda não possui uniformidade para todos os conceitos e terminologias. Em virtude dessa variedade de termos comumente utilizados, buscou-se de uma maneira clara, direta e objetiva a definição dos principais conceitos de interesse, de modo a tornar mais fácil o entendimento dos próximos capítulos.

#### 2.2. Confiabilidade – $R(t)$

O tempo de vida útil de um sistema é medido a partir do início de sua operação (nascimento) até a sua falha total (morte), onde se admite que a falha é um evento instantâneo. No contexto da Engenharia, a falha de um sistema não necessariamente significa o fim de sua vida útil.

Se considerarmos  $X$  como sendo a variável aleatória ‘tempo de vida’, com função de distribuição  $F(\cdot)$ , então  $F(x)$  é chamada de ‘probabilidade de falha’, e,  $R(x) = 1 - F(x)$  é chamada de confiabilidade ou probabilidade de sobrevivência com respeito ao intervalo  $[0,x]$ , pois,  $F(x)$  e  $R(x)$  são as respectivas probabilidades de que o sistema falhe ou não falhe em  $[0,x]$ , BEICHELT (2006).

#### 2.3. Taxa de Falha – $\lambda(t)$

Seja  $F_t(x)$  a função de distribuição do tempo de vida residual  $X_t$  de um sistema que tenha funcionado por um dado período de tempo  $t$ , sem falhas:

$$F_t(x) = P(X_t \leq x) = P(X - t \leq x \mid X > t) \quad (2.1)$$



De acordo com o Teorema da Probabilidade Condicional (JAMES, 1996), para  $x \geq 0$  e  $t \geq 0$ , obtemos:

$$F_t(x) = \frac{P(X-t \leq x \cap X > t)}{P(X > t)} = \frac{P(t < X \leq t+x)}{P(X > t)} = \frac{F(t+x) - F(t)}{R(t)} \quad (2.2)$$

Um sistema está envelhecendo no intervalo  $[t_1, t_2]$ ,  $t_1 < t_2$ , se, para um arbitrário, porém fixo 'x', a probabilidade de falha condicional  $F_t(x)$  estiver aumentando para um tempo t neste intervalo.

Considerando a existência da densidade de falha  $f(x) = F'(x)$ , outra aproximação para modelar o comportamento do envelhecimento de um sistema é baseada no conceito da sua taxa de falha. A probabilidade de falha condicional  $F_t(\Delta t)$  de um sistema no intervalo  $[t, t + \Delta t]$  é considerada relativa ao comprimento  $\Delta t$  deste intervalo. Esta é uma probabilidade de falha condicional por unidade de tempo, isto é, 'uma taxa de probabilidade de falha':

$$\frac{F_t(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \cdot R(t)} \Rightarrow \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F_t(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.3)$$

Esse limite é chamado de 'taxa de falha' e é denotado por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

Como consequência, um sistema está envelhecendo no intervalo  $[t_1, t_2]$ ,  $t_1 < t_2$ , se,  $\lambda(t)$  estiver aumentando para um tempo t neste intervalo (BEICHELT, 2006).

## 2.4. Sistema Reparável

Um sistema é definido como reparável, quando, após a ocorrência de uma falha ele for reparado e voltar a funcionar.

## 2.5. Sistema Não Reparável

Um sistema é definido como não reparável, quando, após a ocorrência de uma falha, ele for descartado.

## 2.6. Reparo Mínimo (*As Bad as Old*)

Ocorre quando a taxa de falha, após o reparo do sistema, é igual à taxa de falha que o sistema possuía imediatamente antes da falha. É a situação de tão ruim quanto velho (ASCHER e FIENGOLD, 1984).

## 2.7. Reparo Perfeito (*As Good as New*)

Ocorre quando a taxa de falha, após o reparo do sistema, é igual à taxa de falha que o sistema possuía quando era novo, ou seja, quando  $t = 0$ . É a situação de tão bom quanto novo (ASCHER e FIENGOLD, 1984).

## 2.8. Taxa de Reparo – $\mu(t)$

É definida como a probabilidade condicional do sistema ter sido reparado em um intervalo de tempo  $[t \text{ e } t + dt]$ , uma vez que o sistema tenha falhado em  $t$ :

$$\mu(t) = P ( t \leq t_1 \leq t + dt \mid t_1 > t ) \quad (2.5)$$

## 2.9. Disponibilidade – $A(t)$

É a probabilidade de um componente ou sistema estar em condições de realizar uma determinada função sob determinadas condições em um instante  $t$ . Quando um sistema não é reparável, o conceito de disponibilidade confunde-se com o de confiabilidade, isto é,  $R(t) = A(t)$ .

Já a disponibilidade média, em um intervalo de tempo  $[0,t]$  é dada pela seguinte expressão (LEWIS, 1994):

$$A^* = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} A(t) dt \quad (2.6)$$

## 2.10. Modelos de Envelhecimento

A distribuição de Weibull é uma das mais utilizadas em confiabilidade e sua definição apresenta-se sob duas formas, a dois ou a três parâmetros e é a manipulação destes parâmetros que possibilita que diversas taxas de falhas possam ser modeladas através desta distribuição.

Quando definida para dois parâmetros, geralmente são utilizados ‘m’ como parâmetro de forma (ou fator de forma) e ‘ $\theta$ ’ como parâmetro de escala (ou fator de escala) (LEWIS, 1994).

A Figura 2.1 mostra as taxas de falhas da distribuição Weibull para diversos parâmetros m. Para  $m = 1$ , temos a distribuição exponencial (taxa de falha constante), para  $m < 1$ , temos o período de amaciamento ou período de falha prematura (taxas decrescentes), e, para  $m > 1$ , temos o período de envelhecimento (taxas de falha crescentes).

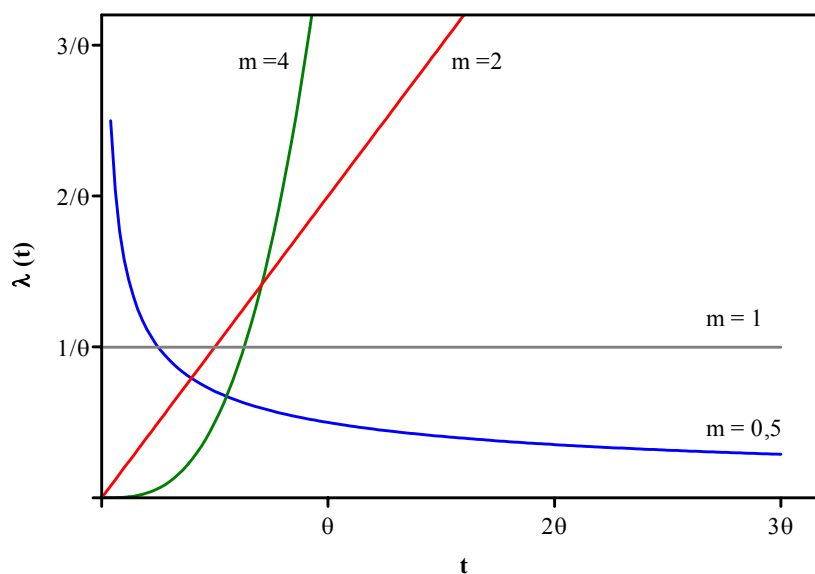


Figura 2.1. Taxas de Falhas da Distribuição Weibull.

onde:

$$\lambda(t) = \frac{m}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{m-1} \quad (2.7)$$

$$f(t) = \frac{m}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{m-1} \exp \left( - \left( \frac{t}{\theta} \right)^m \right) \quad (2.8)$$

O presente estudo irá deter-se na distribuição de Weibull a dois parâmetros, pois os dados de falha utilizados como referência neste trabalho serão os mesmos utilizados por CROSSETTI (2006) na modelagem realizada para o Sistema Elétrico de Angra 1, em função da indisponibilidade desses dados para Angra 2.

### 2.11. Processos Markovianos

Um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias ( $X_t$ ) observadas em diferentes tempos  $t$  (ou, de um modo geral, o processo é indexado pelo parâmetro  $t$ ) e definido em um espaço de probabilidade específico.

Um estado é um valor assumido por uma variável aleatória, e, o espaço de estado de um processo estocástico é o conjunto de todos os possíveis valores que a variável aleatória pode assumir (KARLIN, 1975).

Um processo estocástico é dito markoviano, se:

$$P(a < X_t < b \mid X_{t_1} = x_1, \dots, X_{t_n} = x_n) = P(a < X_t < b \mid X_{t_n} = x_n), \quad t_1 < \dots < t_n. \quad (2.9)$$

Sistemas markovianos são considerados processos sem memória, uma vez que a história passada do sistema não importa para a definição da condição futura, a qual é determinada apenas pelo estado presente.

Um processo estocástico markoviano com espaço de estado discreto (como por exemplo, 3 Geradores funcionando e 1 Gerador falho) e tempo contínuo (como por exemplo, o tempo de falha) é referido como sendo um processo de Markov (LEWIS, 1994).

Sejam  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , os ‘n’ estados de um processo markoviano com tempo contínuo. Transições (por exemplo, um gerador que esteja falho, seja submetido à manutenção e volte a funcionar), ocorrem de um estado para outro, determinadas por um conjunto de números  $\rho_{ij}$  (chamados de taxa de transição de estados), e o sistema continuamente permanece entre transições de estados. Seja  $\rho_{ij}$  a taxa de transição do estado  $S_i$  para  $S_j$ , então  $\rho_{ij} \Delta t = P_{ij}$ , é a probabilidade de transição do estado  $S_i$  para o estado  $S_j$  no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Se  $P_i(t)$  é a probabilidade de encontrarmos o sistema em  $S_i$ , no tempo  $t$ , então, a probabilidade de encontrarmos o sistema em  $S_i$ , em  $t + \Delta t$ , é dada pela equação:

$$P_i(t + \Delta t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ji} \Delta t P_j(t) + \left[ 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} \Delta t \right] P_i(t) \quad (2.10)$$

A probabilidade de encontrarmos o sistema em  $S_i$  em  $t + \Delta t$  é a soma das probabilidades do sistema passar de todos os estados  $S_j$  ( $j = 1, \dots, n, j \neq i$ ) para o estado  $S_i$  no intervalo de tempo  $\Delta t$ , mais a probabilidade do sistema não passar do estado  $S_i$  para todos os estados  $S_j$ , ou seja, permanecer em  $S_i$ , no intervalo de tempo  $\Delta t$ . Com isso, temos a seguinte idéia do balanço de probabilidade: “A probabilidade de se estar em um estado é a soma de todas as probabilidades que chegam ao estado, menos as probabilidades que saem do estado”.

Dividindo a equação 2.10 por  $\Delta t$ , subtraindo-se  $P_i(t)$  em ambos os lados e fazendo  $\Delta t$  tender a zero, temos:

$$P_i'(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ji} P_j(t) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} P_i(t), \quad i=1, \dots, n \quad (2.11)$$

Para todo  $i = 1, \dots, n$ , temos um sistema de “n” equações diferenciais ordinárias, lineares e de coeficientes constantes (PINHO, 2000).

## 2.12. Processos de Renovação

Um processo de renovação é um processo estocástico que pode ser descrito da seguinte maneira:

Seja A, um sistema que falhou enquanto estava em operação, e, B um sistema idêntico a A. Se A, quando da falha, for imediatamente substituído por B, e B continuar a operar do mesmo modo que A antes do momento da falha, diz-se que houve uma renovação.

Generalizando, é um processo estocástico definido por:

Seja  $T_k$  uma seqüência de variáveis aleatórias, identicamente distribuídas, com função de probabilidade dada por  $F_k(t)$ , que representa o tempo de vida de algumas unidades. A primeira unidade começa a operar em um tempo  $t_0$ , a primeira falha ocorre em um tempo  $t_1$ , e, é imediatamente substituída. A segunda falha ocorre em um tempo  $t_1 + t_2$ , que é um tempo chamado de segunda renovação. O tempo da enésima renovação é igual a  $t_1 + t_2 + \dots + t_n$ .

Definimos um processo de contagem  $N(t)$ , onde  $N(t)$  é chamado de Processo de Renovação de Contagem. Note que  $N(t)$  é o número aleatório de renovações em  $(0, t]$ .

$$N(t) = \begin{cases} \max(n; T_n \leq t) & , t \geq 0 \\ 0, t < T_0 \end{cases} \quad (2.12)$$

O valor médio de  $N(t)$  é chamado de função de renovação, que para seguirmos a terminologia atual, denotaremos como  $H(t)$ .

Supondo que  $H(t)$  é derivável, com derivada  $h(t)$  respectivamente e realizando alguns cálculos (BEICHEL, 2006), chegamos à seguinte equação de renovação:

$$H(t) = F(t) + \int_{x=0}^{x=t} H(t-x)dF(x), t \geq 0 \quad (2.13)$$

As equações integrais do tipo da equação (2.13) e equações semelhantes a ela são chamadas de equações de renovação, que são um tipo de equação integral de Volterra. Definições mais detalhadas sobre essas equações e sobre o teorema da

existência e unicidade, bem como sobre a análise de estabilidade, podem ser encontradas em (BURTON, 1983) e (RIGDON e BASU, 2000).

### **2.13. Conclusão**

Neste capítulo, fez-se uma pequena seleção dos conceitos básicos sobre confiabilidade que serão utilizados nos próximos capítulos desta dissertação. Em especial, destaca-se a Equação de Renovação, que será aplicada mais adiante no capítulo 5, na modelagem das equações de Variáveis Suplementares, utilizando-se a hipótese de reparo perfeito.

## Capítulo 3

### – Equações de Variáveis Suplementares –

#### 3.1. Introdução

Este capítulo trata da teoria matemática das variáveis suplementares que mais adiante, no Capítulo 5, dará suporte ao algoritmo que será utilizado na modelagem dos geradores diesel de emergência.

Inicialmente, são apresentados alguns aspectos básicos sobre a modelagem matemática, sobre um estudo para a solução analítica e sobre o método para a solução numérica.

Alguns modelos são utilizados na explicação de fenômenos complexos. A finalidade desta utilização é facilitar o entendimento desses fenômenos através de processos básicos, mais simples. Por isso, esses modelos são chamados de modelos explicativos.

Um famoso exemplo de modelo explicativo é a Teoria de Newton para o movimento dos planetas, pelo qual o completo movimento do sistema solar foi descrito como sendo uma consequência de ‘força = massa x aceleração’, e, o quadrado inverso da lei gravitacional.

Entretanto, nem todos os modelos podem ser considerados explicativos, como, por exemplo, é o caso do modelo de Black-Scholes para a descrição da evolução de preços no mercado financeiro, muito usado por investidores em todo o mundo. Esse modelo diz que a diferença percentual entre os preços de mercado de um dia para o outro é uma variável aleatória e que segue uma distribuição lognormal. Embora esta seja uma boa simplificação, apenas possibilita saber a média e a variância desta distribuição, nada explicitando sobre o que possa causar a mudança dos preços (HOWISON, 2005).

Seguindo essa idéia e com o objetivo de explicar de uma maneira mais simples e mais elegante, a filosofia do Método das Variáveis Suplementares, foram introduzidos alguns conceitos sobre a modelagem de sistemas biológicos, especialmente a modelagem dinâmica de uma população, com a intenção de fazer uma comparação entre a hipótese de reparo perfeito adotada para este trabalho e o processo de renovação.



Além disso, esse paralelo contribui para facilitar o entendimento de modelos não lineares, como é o caso da confiabilidade dinâmica (COCOZZA et al., 2006).

Quando um modelo matemático é analisado, faz-se necessário saber se ele tem solução, para que condições ele tem solução, e, finalmente, se essa solução é única. No que diz respeito aos métodos numéricos utilizados para a solução de problemas relacionados à confiabilidade de sistemas onde o tempo é fator relevante, ressalta-se para alguns casos, a complexidade do problema, existindo vários estudos sobre os métodos de solução mais eficientes, dentre os quais, destacam-se: COCOZZA et al. (2006), PINHO et al. (1999) e PINHO et al. (2005).

No presente estudo, apresenta-se um novo método iterativo para o sistema de variáveis suplementares, e, como consequência do estudo da solução analítica, uma parte dessa solução é utilizada no método numérico.

### **3.2. Modelagem Biológica**

Historicamente, a ligação entre a biomatemática e a confiabilidade foi iniciada em 1916, quando Volterra modelou uma equação integral (Equação Integral de Volterra) com o objetivo de analisar a dinâmica de peixes no mar Adriático. Em 1940, Feller soube do trabalho desenvolvido por Volterra e modelou as equações do processo de renovação descrito no capítulo anterior do presente estudo (BURTON, 1983).

Do mesmo modo aconteceu para as equações de variáveis suplementares. Em 1926, McKendrick modelou as equações da dinâmica populacional, e, em 1955, Cox modelou as equações de variáveis suplementares (PINHO, 2000).

Foi McKendrick quem primeiro introduziu o conceito de envelhecimento em uma estrutura dinâmica para uma população de um único sexo. O modelo desenvolvido por ele, assumia que a população feminina poderia ser descrita como função de duas variáveis: a idade ( $x$ ) e o tempo ( $t$ ). Para ilustrar o que foi feito por McKendrick, considera-se:

Seja  $p(x,t)$  a densidade de indivíduos com idade  $x$  em um instante  $t$ , isto é, o número de indivíduos com idade entre  $x$  e  $x + \Delta x$ , no instante  $t$ , é aproximadamente  $p(x,t) \Delta x$ .

A população total em um instante  $t$  é aproximadamente  $\sum_x p(x,t) \Delta x$ . O limite quando  $\Delta x$  tende a zero é  $\int_{x=0}^{x=\infty} p(x,t) dx$ . Define-se a população total como:

$$P(t) = \int_{x=0}^{x=\infty} p(x,t) dx \quad (3.1)$$

Na prática é razoável esperar que  $p(x,t) = 0$  para  $x$  maior que um certo  $x_0$  (como por exemplo, a idade máxima para os seres humanos:  $x_0 \approx 110$  anos) (CASTILLO-CHAVEZ e BRAUER, 2001).

McKendrick assumiu que os membros da população deixavam de fazer parte dela apenas em função de suas mortes, com taxa de morte igual a  $\lambda(x)$ . Isto significa que dentro do intervalo de  $t$  a  $t + \Delta t$ , uma fração  $\lambda(x) \Delta t$  de membros com idades entre  $x$  e  $x + \Delta x$ , morreram no instante  $t$ , onde  $\Delta t \rightarrow 0$ .

No instante  $t$ , existem  $p(x,t)\Delta x$  indivíduos com idades entre  $x$  e  $x + \Delta x$ . Entre os instantes  $t$  e  $t + \Delta t$ , o número de mortes de indivíduos com esta idade é  $p(x,t)\Delta x\lambda(x)\Delta t$ , e, os sobreviventes, com idades entre  $x + \Delta t$ , e,  $x + \Delta t + \Delta x$  em um instante  $t + \Delta t$ . Tem-se, então:

$$p(x + \Delta t, t + \Delta t)\Delta x \approx p(x,t)\Delta x - p(x,t)\lambda(x)\Delta x\Delta t \quad (3.2)$$

Dividindo-se a equação (3.2) por  $\Delta t\Delta x$ , obtém-se:

$$\frac{p(x + \Delta t, t + \Delta t) - p(x,t)}{\Delta t} + \lambda(x)p(x,t) \approx 0 \quad (3.3)$$

Assumindo que a densidade  $p(x,t)$  é uma função diferenciável de  $x$  e  $t$ , obtém-se:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(x + \Delta t, t + \Delta t) - p(x,t)}{\Delta t} &= \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(x + \Delta t, t + \Delta t) - p(x, t + \Delta t)}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(x, t + \Delta t) - p(x,t)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p_x(x, t + \Delta t) + p_t(x,t)) = p_x(x,t) + p_t(x,t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Fazendo  $\Delta t$  tender a zero na equação (3.3) e substituindo na equação (3.4), obtém-se:

$$p_x(x,t) + p_t(x,t) + \lambda(x)p(x,t) = 0 \quad (3.5)$$

A equação (3.5) é chamada de Equação de McKendrick.

Agora, assume-se que existe um processo de nascimento governado por uma função  $[\mu(x)]$  chamada de taxa de nascimento, isto é,  $\mu(x)\Delta t$  é o tamanho da prole formada por indivíduos com idades entre  $x$  e  $x + \Delta x$  no intervalo de tempo entre  $t$  e  $t + \Delta t$ . Então, o número total de nascimentos entre  $t$  e o instante  $t + \Delta t$ , é,  $\Delta t \sum \mu(x)p(x,t)\Delta x$ , então:

$$\Delta t \sum \mu(x)p(x,t)\Delta x \xrightarrow{\Delta x \rightarrow 0} \Delta t \int_0^{\infty} \mu(x)p(x,t)dx \quad (3.6)$$

Esta quantidade também é  $p(0,t)\Delta t$ , ou seja, obtém-se a Condição de Renovação.

$$p(0,t) = \int_0^{\infty} \mu(x)p(x,t)dx \quad (3.7)$$

Com isso, obtém-se:

$$p_x(x,t) + p_t(x,t) + \lambda(x)p(x,t) = 0 \quad (3.8)$$

Com condição inicial:

$$p(x,0) = f(x) \quad (3.9)$$

E, condição de contorno:

$$p(0,t) = \int_0^{\infty} \mu(x)p(x,t)dx \quad (3.10)$$

Uma outra maneira de modelar-se a equação de McKendrick pode ser vista em MURRAY (2002).

Seja  $p(x,t)$  a densidade da população em um instante  $t$  com idade entre  $x$  e  $x + \Delta x$ , e,  $\mu(x)$  e  $\lambda(x)$  as taxas de nascimento e morte respectivamente. Para um incremento infinitesimal de tempo  $dt$ , o número de mortes da população com idade  $x$ , é:  $\lambda(x)p(x,t)dt$ . A taxa de nascimentos só contribui para  $p(0,t)$ , o que indica que não podem existir nascimentos com idades  $x > 0$ . Então, pela lei da conservação da população (taxa de variação da população = número de nascimentos – número de mortes + migração), tem-se:

$$dp(x,t) = p_x(x,t)dx + p_t(x,t)dt = -\lambda(x)p(x,t)dt \quad (3.11)$$

Dividindo por  $dt$  e notando que  $dx / dt = 1$ , onde  $x$  é a idade cronológica, tem-se:

$$p_x(x,t) + p_t(x,t) = -\lambda(x)p(x,t) \quad (3.12)$$

Analogamente à modelagem anterior, tem-se:

$$p(x,0) = f(x) \quad (3.13)$$

$$p(0,t) = \int_0^{\infty} \mu(x)p(x,t)dx \quad (3.14)$$

Essa equação aparece em diferentes áreas da Biologia, como em modelos de proliferação, modelos epidemiológicos, entre outros onde a idade é um fator importante.

### 3.3. Variáveis Suplementares

A idéia básica do Método das Variáveis Suplementares é a inclusão de variáveis adicionais até o sistema tornar-se markoviano (COX e MILLER, 1965) e (COX, 1955).

Em PINHO (2000) pode ser observado como é realizada a modelagem utilizando a inclusão de variáveis suplementares, deduzindo-se os mesmos sistemas de equações que são modelados pela Biologia. Pode-se considerar a transição entre os estados de falha como transições de uma população para diversos estados. Desta forma, torna-se possível a utilização da mesma técnica descrita no item anterior para a modelagem das iterações de falhas em equipamentos, através da analogia entre a taxa de falha e a taxa de mortalidade, e do mesmo modo, entre a taxa de reparo e a taxa de nascimentos.

Assim, para um sistema de dois estados (MURRAY, 2002), utilizando-se as equações (3.12), (3.13) e (3.14), obtém-se:

$$\frac{\partial p_1(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p_1(x,t)}{\partial t} = -\lambda(x)p_1(x,t) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial p_2(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p_2(x,t)}{\partial t} = -\mu(x)p_2(x,t) \quad (3.16)$$

$$p_1(x,0) = f(x) \quad (3.17)$$

$$p_2(x,0) = 0 \quad (3.18)$$

$$p_1(0,t) = \int_0^{\infty} \mu(x)p_2(x,t)dx \quad (3.19)$$

$$p_2(0,t) = \int_0^{\infty} \lambda(x)p_1(x,t)dx \quad (3.20)$$

Para um sistema de H estados (MURRAY, 2002), temos um sistema da forma:

$$\frac{\partial p^i(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p^i(x,t)}{\partial t} = -\lambda^i(x)p^i(x,t) \quad (3.21)$$

$$p^1(x,0) = f(x) \quad (3.22)$$

$$p^i(x,0) = 0, \forall i = 2, \dots, H \quad (3.23)$$

$$p^i(0, t) = \sum_{j=1}^{j=H} \int_0^{\infty} \mu^{ij}(x) p_1(x, t) dx, \forall i = 1, \dots, H \quad (3.24)$$

onde  $\mu^{ij}(x)$  e  $\lambda^i(x)$  são as taxas de transições de estados.

### 3.4. Conceitos Básicos sobre Equações Diferenciais de 1ª Ordem

A idéia principal para resolver-se uma equação diferencial parcial de primeira ordem (EDP) consiste em transformá-la em um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO) GUSTAFSON (1999) e IÓRIO (1991).

A presente dissertação, de acordo com o que foi mostrado nos parágrafos anteriores, irá tratar de equações semelhantes à equação (3.12). Para isso, inicia-se com uma equação mais simples, chamada de Equação de Translação (GUSTAFSON, 1999).

$$p_x(x, t) + p_t(x, t) = 0, \quad (3.25)$$

com a condição inicial  $p(x, 0) = f(x)$ .

De acordo com a Regra da Cadeia do Cálculo Diferencial e Integral, a derivada total da função  $p(x, t)$  fica da seguinte forma:

$$\frac{dp(x, t)}{dt} = \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.26)$$

Se puderem ser encontradas  $x(t)$  curvas do plano  $\mathbb{R}^2$  tais que  $dx / dt = 1$ , nessas curvas (chamadas de Características da Lei de Conservação), obtém-se:

$$0 = \frac{dp(x, t)}{dt} = \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \frac{dx}{dt} = p_t(x, t) + p_x(x, t) \quad (3.27)$$

Como nos mostra a equação (3.27), tem-se que a solução é constante ao longo da característica  $x - t$ . Então,  $p(x, t)$  é a solução (desde que a função  $f$  seja contínua com

derivada primeira contínua na região de interesse da solução, chamaremos de solução  $C^1$ ) (TVEITO e WINTHER, 1998).

Considera-se agora a seguinte condição  $p(0,t) = h(t)$ , então, a solução deste novo problema fica da seguinte forma:

$$p_x(x,t) + p_t(x,t) = 0 \quad (3.28)$$

$$p(0,t) = h(t) \quad (3.29)$$

$$p(x,0) = f(x) \quad (3.30)$$

Supondo que  $g(0) = h(0)$  e  $g'(0) = h'(0)$ , então conforme TVEITO e WINTHER, (1998):

$$p(x,t) = \begin{cases} f(x-t), & x \geq t \\ g(t-x), & t > x \end{cases} \quad (3.31)$$

Trabalha-se agora com a seguinte equação:

$$p_x(x,t) + p_t(x,t) + \lambda(x)p(x,t) = 0 \quad (3.32)$$

$$p(x,0) = f(x) \quad (3.33)$$

$$p(0,t) = h(t) \quad (3.34)$$

Seja  $\psi(x)$  uma função, tal que:

$$p(x,t) = p^*(x,t) \psi(x) \quad (3.35)$$

Então:

$$p_x(x,t) = p_x^*(x,t) \psi(x) + p^*(x,t) \psi'(x) \quad (3.36)$$

$$p_t(x,t) = p_t^*(x,t) \psi(x) \quad (3.37)$$

Substituindo-se as equações (3.35), (3.36) e (3.37) na equação (3.32), obtém-se:

$$p_x^*(x,t) \psi(x) + p^*(x,t) \psi'(x) + p_t^*(x,t) \psi(x) = -p^*(x,t) \psi(x) \lambda(x) \quad (3.38)$$

Fazendo-se  $\psi'(x) = -\psi(x) \lambda(x)$ , obtém-se:

$$\Psi(x) = \exp\left(-\int \lambda(x) dx\right) \quad (3.39)$$

A equação (3.39) é uma função chamada de fator integrante para a equação (3.32). Com isso, a equação (3.38) fica da seguinte forma:

$$p_x^*(x,t) + p_t^*(x,t) = 0 \quad (3.40)$$

Substituindo-se as equações (3.34) e (3.35) em (3.37), obtém-se:

$$p^*(0,t) = h(t) / \psi(0) \quad (3.41)$$

$$p^*(x,0) = f(x) / \psi(x) \quad (3.42)$$

Logo, pelas equações (3.28), (3.29), (3.30) e (3.31), a equação (3.40) com as condições (3.41) e (3.42), obtém-se:

$$p^*(x,t) = \begin{cases} f(x-t) / \Psi(x-t), & x \geq t \\ g(t-x) / \Psi(0), & t > x \end{cases} \quad (3.43)$$

Substituindo-se (3.39) em (3.43), obtém-se a solução de (3.32), (3.33) e (3.34) da seguinte forma:



$$p(x,t) = \begin{cases} \Psi(x)f(x-t)/\Psi(x-t), x \geq t \\ \Psi(x)g(t-x)/\Psi(0), t > x \end{cases} \quad (3.44)$$

Assim, pode-se resolver a equação (3.12) com as condições (3.13) e (3.14), aplicando-se o fator integrante (3.39) na equação (3.12), e, analogamente ao que foi realizado anteriormente, obtém-se (MURRAY, 2002):

$$p_x^*(x,t) + p_t^*(x,t) = 0 \quad (3.45)$$

$$p^*(x,0) = f(x) / \psi(x) \quad (3.46)$$

$$p^*(0,t) = \int_0^{\infty} \Psi(x)\mu(x)p(x,t)dx / \Psi(0) \quad (3.47)$$

Seja  $p^*(0,t) = B(t)$ , na equação (3.43):

$$p^*(x,t) = \begin{cases} f(x-t)/\Psi(x-t), x \geq t \\ B(t-x), t > x \end{cases} \quad (3.48)$$

Com isso, obtém-se:

$$B(t) = \int_{x=0}^{x=t} \Psi(x)B(t-x)\mu(x)dx / \Psi(0) + \int_{x=t}^{x=\infty} \frac{f(x-t)}{\Psi(0) - \Psi(x-t)} \Psi(x)\mu(x)dx \quad (3.49)$$

Que é a Equação de Renovação apresentada no Capítulo 2.

Desde que  $\int_{x=t}^{x=\infty} \frac{f(x-t)}{\Psi(0) - \Psi(x-t)} \Psi(x)\mu(x)dx$  exista, então  $B(t)$  é a solução da

Equação de Renovação.

Para provar a existência e unicidade da solução da equação (3.12) de acordo com as condições (3.13) e (3.14), basta provar a existência e unicidade da solução da equação (3.49), como mostrado em PINHO et al. (2005).

As EDPs apresentadas no presente estudo são chamadas na literatura de Equações Diferenciais Parciais Hiperbólicas de 1ª Ordem com Lei de Conservação.

O termo hiperbólico pode ser explicado da seguinte forma: considerando-se um sistema de EDPs, onde  $u(x,t)$  e  $f(u)$  são funções do  $\mathbb{R}^N$ :

$$u_t(x,t) + (f(u))_x = 0 \quad (3.50)$$

Então, um sistema formado por equações da Lei de Conservação pode ser transformado em um sistema quase linear (GUSTAFSON, 1999):

$$u_t(x,t) + A(u)u_x = 0 \quad (3.51)$$

onde  $A$  é a matriz jacobiana de  $f$ . Se os auto valores de  $A$  são reais, então o sistema é chamado de hiperbólico.

No que diz respeito à Lei de Conservação, se integrarmos a equação (3.50) em relação a  $x$ , e, exigindo-se que a solução seja  $C^1$ , conforme o apresentado em HOLDEN e RISEBRO (2002):

$$\frac{d}{dt} \int_{x=0}^{x=\infty} u(x,t) dx = f(u(0,t)) - \lim_{x \rightarrow \infty} f(u(x,t)) \quad (3.52)$$

ou seja, a quantidade  $d \int_{x=0}^{x=\infty} u(x,t) / dt$  é constante (conservada) ao longo da solução. Para

o caso tratado neste estudo, as quantidades conservadas são as probabilidades ao longo dos estados (PINHO, 2000).

De acordo com essas observações, pode-se dizer que o sistema de equações que representam as variáveis suplementares é um sistema hiperbólico de primeira ordem de Lei de Conservação.

### 3.5. Solução Numérica

O método que será utilizado para a solução do problema tratado nesta dissertação será o método de Euler Iterativo + Característica, desenvolvido a partir do

que foi apresentado em PINHO et al. (2006). Este método tem como característica principal o uso de parte da solução analítica no algoritmo do método de Euler Iterativo. Como o caso estudado nesta dissertação trata de um sistema com 12 equações diferenciais parciais, o fato do método possibilitar o uso de parte dessa solução analítica permite vantagens no que diz respeito à convergência da solução. Outros métodos já foram utilizados na solução de problemas semelhantes, como o método Explícito (PINHO et al., 1999), o método das Transformadas de Laplace (OLIVEIRA, 2001) e o método dos Volumes Finitos (COCOZZA et. al., 2006).

O método de Euler Iterativo + Característica, apresenta as seguintes vantagens:

- Parte de um método incondicionalmente estável e de segunda ordem (ANDERSON et. al., 1984);
- Ao contrário de ACKLEH e ITO (1998) que utilizam uma aproximação para a condição de contorno, o método de Euler Iterativo + Característica, faz iterações para calcular a condição de contorno (por exemplo, a equação (3.55)) e;
- De acordo com o exposto na equação (3.48), sabe-se a solução analítica para  $x > t$ , e, portanto, utiliza-se essa informação como parte da solução numérica.

Utiliza-se o seguinte sistema de equações para a apresentação do método de Euler Iterativo:

$$p_x(x,t) + p_t(x,t) + \lambda(x)p(x,t) = 0 \quad (3.53)$$

$$p(x,0) = f(x) \quad (3.54)$$

$$p(0,t) = \int_0^{\infty} \lambda(x)p(x,t)dx \quad (3.55)$$

Utilizando-se a técnica do fator integrante apresentado na equação (3.39), e o fato de que  $\lambda(x)$  é a taxa de falha, bem como  $f(x)$  é a densidade de falha, tem-se, então:

$$p_x^*(x,t) + p_t^*(x,t) = 0 \quad (3.56)$$

$$p^*(x,0) = \lambda(x) \quad (3.57)$$

$$p^*(0, t) = \int_0^{\infty} f(x)p(x, t)dx \quad (3.58)$$

Aplica-se o método de Euler Implícito no sistema de equações (3.56), (3.57) e (3.58). A fim de facilitar a manipulação das equações, define-se a notação a partir de  $p^*(x, t) = p(x, t)$ .

Fazendo-se a discretização no intervalo  $[0, X]$  em  $I$  pontos com tamanhos de discretização  $\Delta x$  e em  $[0, T]$  com  $J$  pontos com tamanho  $\Delta t$ , obtém-se:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{i, j+1} \cong \frac{p^{i+1, j+1} - p^{i-1, j+1}}{2\Delta x} \quad (3.59)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{i, j+1} \cong \frac{p^{i, j+1} - p^{i, j}}{\Delta t} \quad (3.60)$$

$$\int_{x=0}^{x=\infty} f(x)p(x, j+1)dx \cong \sum_{i=0}^I f_i \Delta x \omega_i p^{i, j+1} \quad (3.61)$$

onde  $\omega_i$  é o peso de um Método da Quadratura a ser mostrado a seguir.

Substituindo-se as equações (3.59), (3.60) e (3.61) nas equações (3.56) e (3.8), tem-se:

$$kp_1^{i+1, j+1} + p_1^{i, j+1} - kp_1^{i-1, j+1} = p_1^{i, j} \quad \forall i = 2, \dots, I \quad \forall j = 0, \dots, J \quad (3.62)$$

onde,  $k = \frac{\Delta t}{2\Delta x}$ .

Fazendo-se  $i = 1$  na equação (3.62), obtém-se:

$$kp^{2, j+1} + p^{1, j+1} = p^{1, j} + k \left( \sum_{i=0}^I f_i \Delta x \omega_i p^{i, j+1} \right) \quad \forall i = 2, \dots, I \quad \forall j = 0, \dots, J \quad (3.63)$$

Seja  $\alpha_i = \Delta x \varpi_i f_i$ . Colocando-se o sistema formado pelas equações (3.62) e (3.63) na forma matricial, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} 1 - k\alpha_1 & -k\alpha_2 & -k\alpha_3 & -k\alpha_4 & \dots & -k\alpha_I \\ -k & 1 & k & 0 & \dots & \dots \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 0 & \dots & 0 & -k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^{1,j+1} \\ \dots \\ p^{I,j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^{1,j} \\ p^{2,j} \\ \cdot \\ p^{I,j} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Define-se:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -k & 1 & k & 0 & \dots & \dots \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -k & 1 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$p^{j+1} = \begin{bmatrix} p^{1,j+1} \\ \dots \\ p^{I,j+1} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

A matriz do sistema (3.64) não está na forma matricial e por causa disso usa-se um método bloco-iterativo para o desacoplamento do sistema.

Define-se:

$$Q = \begin{bmatrix} -k\alpha_1 & -k\alpha_2 & -k\alpha_3 & -k\alpha_4 & \dots & -k\alpha_I \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Substituindo as equações (3.65), (3.66) e (3.67) e definindo-se uma nova seqüência para resolução do sistema (3.64):

$$T p_{n+1}^{j+1} = p^j + Q p_n^{j+1} \quad (3.68)$$

Para determinar-se  $p_{n+1}^{j+1}$  na equação (3.68), utiliza-se o algoritmo de Thomas (ANDERSON et. al., 1984), pois, a matriz T é tridiagonal e é um método de fácil implementação.

Generalizando-se para um sistema com H estados, tem-se:

$$T p_{n+1}^{r,j+1} = p^{r,j} + \sum_{s=1}^H Q_{sr} p_n^{s,j+1}, \forall r = 1 \dots H \quad (3.69)$$

onde os  $Q_{sr}$  são matrizes do tipo do sistema (3.67).

Assim, apresentou-se o método de Euler Iterativo. O método de Euler Iterativo + Característica inclui o fato da solução analítica para  $i > j + 1$  ser sempre conhecida.

Tem-se o seguinte algoritmo:

- Atribui-se um valor inicial para  $p_0^{r,j+1}$ , onde sejam satisfeitas as condições iniciais  $p(x,0)$  e a solução característica, ou seja, para  $x > t$ , sabe-se a solução analítica.
- Para  $j = 1, \dots, J - 1$ , e,  $r = 1, \dots, H$ , calcula-se  $p_{n+1}^{r,j+1}$  pela equação (3.69) até convergir, isto é,  $\|p_{n+1}^{r,j+1} - p_n^{r,j+1}\| < \text{erro}$ , adequando-se os valores para as condições iniciais e as soluções características.
- Volta-se ao sistema original através do fator integrante.

### 3.6. Conclusão

Neste capítulo, apresentou-se a modelagem de um sistema considerando a hipótese de reparo perfeito ou tão bom quanto novo (*as good as new*). Essa hipótese de tipo de reparo adotado fica evidente na equação (3.49).

Também foi apresentada uma maneira de modelar o problema utilizando as técnicas provenientes da biomatemática, onde a analogia entre taxas de nascimento e taxas de reparo, assim como taxas de mortalidade e taxas de falha, foram oportunamente realizadas.

Finalmente, apresentou-se um novo método numérico chamado de Euler Iterativo + Característica, desenvolvido a partir do método de Euler Iterativo para a solução do problema proposto.

# Capítulo 4

## – Sistema Elétrico de Angra 2 –

### 4.1. Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica em uma usina nuclear são, normalmente, semelhantes aos utilizados em centrais hidroelétricas e térmicas comuns, exceto que maiores cuidados, exigências e redundâncias são requisitados aos equipamentos que são necessários à operação da usina nuclear, assegurando que os desligamentos do reator, programados ou não (originários de falhas externas ou internas), sejam realizados com grau de segurança mais elevado (BRANDI, 1986).

Uma central nuclear convencional é composta por um grande número de sistemas ativos, ou seja, dispositivos e equipamentos que necessitam de energia elétrica para operarem. Em condições normais, o Sistema de Suprimento de Energia Elétrica (SSEE) da Central Nuclear de Angra 2, supre as cargas que são necessárias para a operação normal da usina, e, em condições de emergência, as cargas de segurança que são essenciais para o desligamento seguro do reator.

Desta forma, o perfeito funcionamento do sistema que fornece energia elétrica para as diversas cargas e serviços da planta, reveste-se de grande importância para a segurança da mesma, pois é projetado para fornecer de maneira segura e confiável, o suprimento de energia necessário para o funcionamento eficiente dos sistemas que são utilizados no controle e mitigação dos acidentes postulados.

Este capítulo tem por finalidade apresentar de maneira simplificada o funcionamento e a organização do Sistema de Suprimento de Energia Elétrica (SSEE) da Central Nuclear de Angra 2, objetivando o entendimento do funcionamento dos geradores diesel de emergência da mesma.

### 4.2. Função do Sistema

O Sistema de Suprimento de Energia Elétrica (SSEE) da Central Nuclear de Angra 2, tem como função satisfazer as demandas de energia elétrica que são requeridas



pelas diversas cargas e serviços da planta, na partida, em operação, parada normal, e em casos de acidentes onde sejam requeridos os sistemas de emergência da mesma.

Durante a operação normal da central, bem como em situações de emergência ou em casos de acidentes, o SSEE supre energia para todas as cargas da planta, tanto as de segurança, classe E1 (“*Safety Related*”), como as que não são de segurança, classe E2 (“*Non-Safety Related*”).

O projeto do SSEE da C. N. de Angra 2, foi elaborado para atender aos Critérios BMI de segurança para centrais nucleares de projeto alemão (FSAR, 2005).

Para o presente estudo é importante considerar o Critério BMI 7.1 para o suprimento de potência de emergência. Este critério estabelece que adicionalmente ao suprimento de potência para as cargas e serviços da planta através do Sistema de Suprimento Elétrico Normal (SSEN), um suprimento de potência de emergência confiável deve estar disponível a fim de suprir os equipamentos e sistemas da planta que cumprem funções de segurança. Além disso, redundantes unidades geradoras diesel de emergência devem estar igualmente disponíveis para o suprimento dos equipamentos e sistemas de segurança de tal maneira que, mesmo durante procedimentos de testes e manutenções coincidentes com a ocorrência de uma falha única, o suprimento de potência de emergência adequado para esses equipamentos e sistemas seja assegurado.

### **4.3. Descrição do Sistema**

#### **4.3.1. Sistema Elétrico – Visão Geral**

A Figura 4 mostra o diagrama unifilar simplificado do Sistema de Suprimento de Energia Elétrica (SSEE) da Central Nuclear de Angra 2, que é composto:

- ⇒ Pela Rede Externa Principal de 525 KV, interligada com a rede de transmissão;
- ⇒ Pelo Gerador Principal MK, que fornece energia para a rede interligada;
- ⇒ Pela Rede Externa Reserva (ou Rede Externa de Prontidão) de 138 KV, que serve como suporte em caso de indisponibilidade das fontes anteriormente mencionadas e;
- ⇒ Pelos equipamentos do Sistema Elétrico Auxiliar.

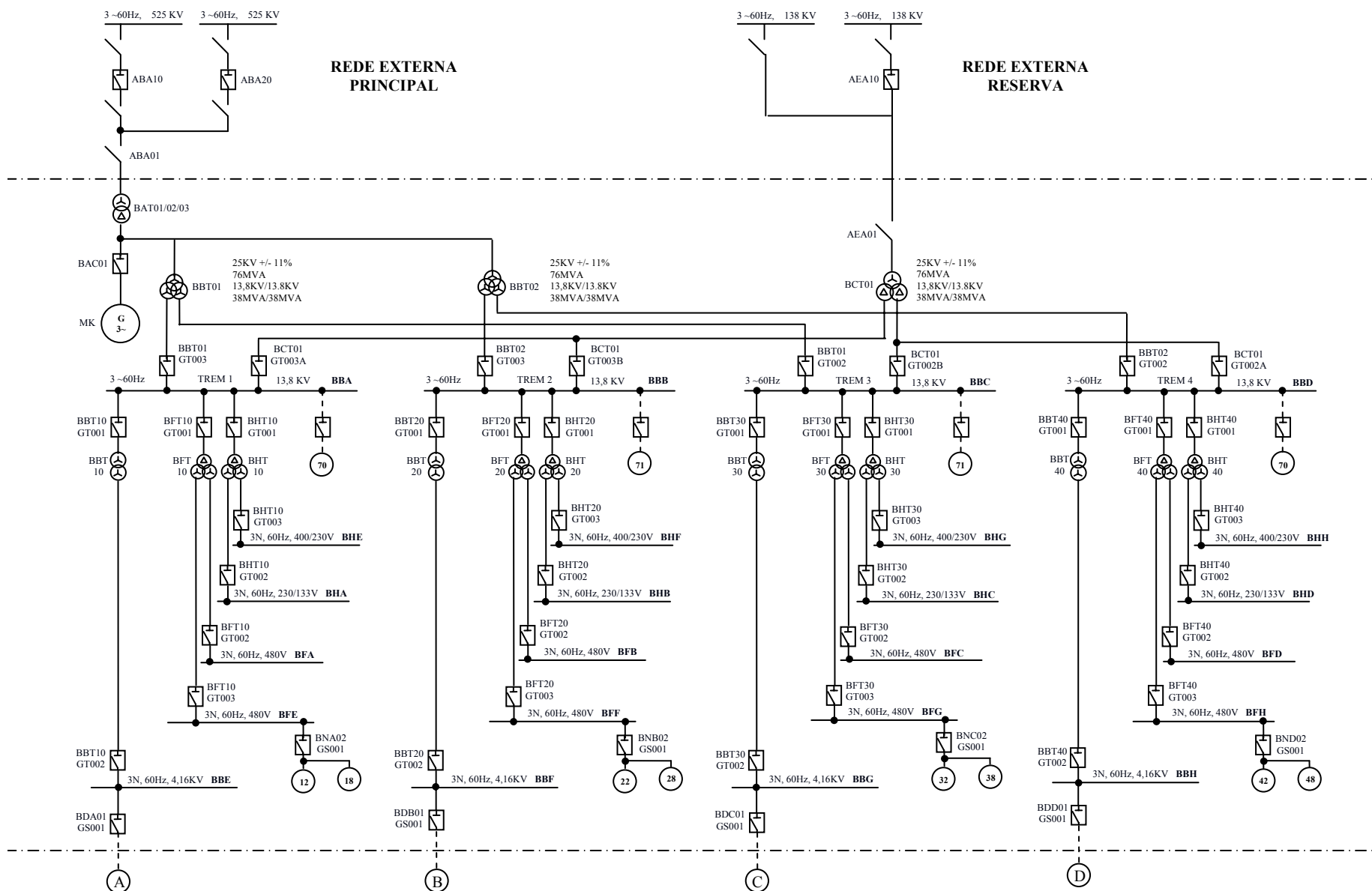


Figura 4.1a. Diagrama Unifilar Simplificado – Sistema de Suprimento Elétrico Normal

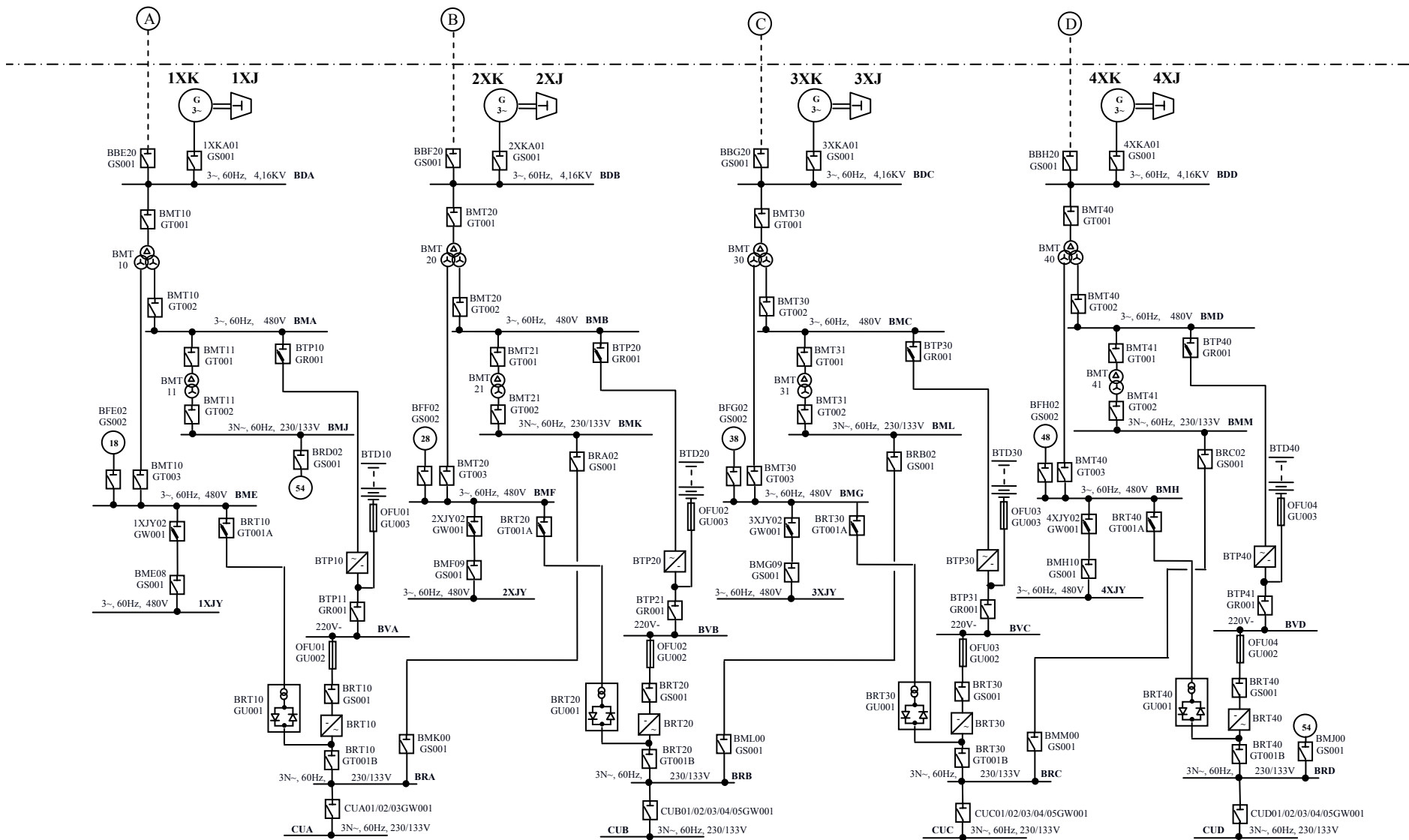


Figura 4.1b. Diagrama Unifilar Simplificado – Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1

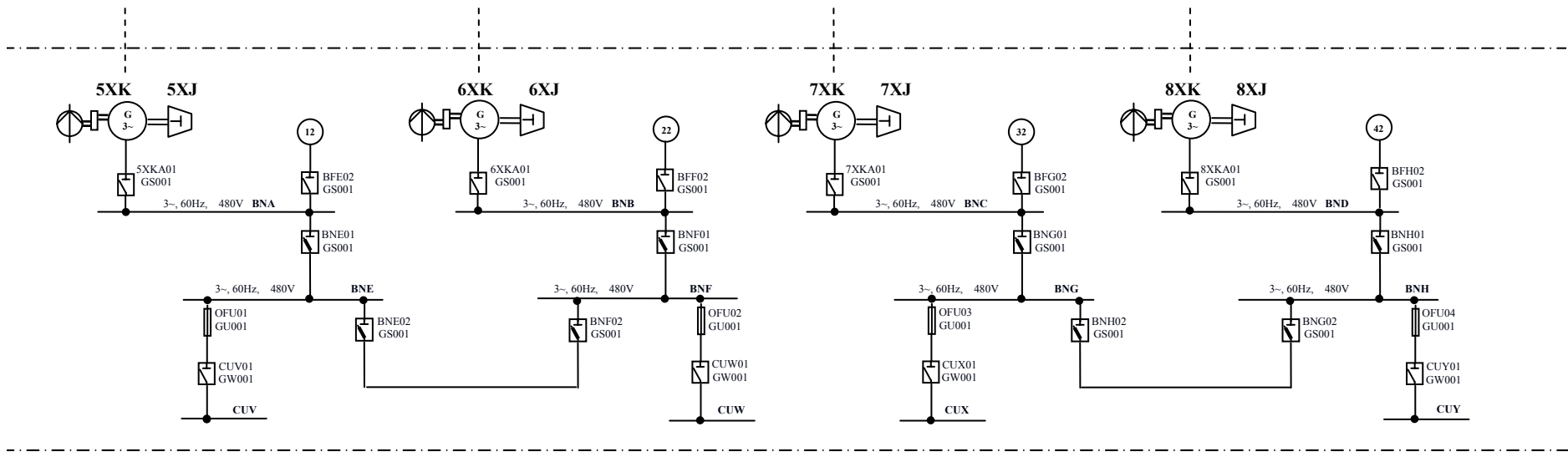


Figura 4.1c. Diagrama Unifilar Simplificado – Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2

#### 4.3.1.1. Rede Externa Principal de 525 KV

A Rede Externa Principal de 525 KV é constituída de um barramento trifásico em forma de anel e está interligada com as subestações de Cachoeira Paulista, Adrianópolis e Grajaú, além das conexões com os geradores de Angra 1 e Angra 2, e, tem como função principal interligar a Central Nuclear, Angra 1 e Angra 2, com o Sistema Elétrico Interligado, através de três linhas de transmissão, possibilitando, além do transporte da energia gerada nas duas usinas, o suprimento dos seus equipamentos auxiliares, quando o Gerador Principal estiver desconectado do Sistema.

#### 4.3.1.2. Gerador Principal MK

Durante o funcionamento normal, a alimentação ao consumo próprio é suprida pelo Gerador Principal MK, através dos transformadores auxiliares de alta tensão BBT01 e BBT02. Durante partida e parada, essa alimentação é suprida pela Rede Externa Principal de 525 KV.

O Gerador Principal MK, ligado pelo disjuntor do gerador (BAC01), transmite energia elétrica para a Rede Externa Principal de 525 KV, através dos transformadores elevadores BAT01/02/03, e, para o Sistema de Suprimento Elétrico Normal (ou Rede Normal), através dos transformadores auxiliares de alta tensão BBT01 e BBT02.

#### 4.3.1.3. Rede Externa Reserva de 138 KV

Do ponto de vista de Angra 2, a principal função da Rede Externa Reserva de 138 KV é servir de fonte de alimentação alternativa e segura para os auxiliares da Unidade.

#### 4.3.1.4. Sistema Elétrico Auxiliar

O fornecimento de energia elétrica para as diversas cargas dos sistemas auxiliares de Angra 2 é feito através do Sistema Elétrico Auxiliar (ou Sistema Elétrico Interno), o qual consiste basicamente dos seguintes sistemas:

- ⇒ Sistema de Suprimento Elétrico Normal (SSEN);
- ⇒ Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 (SSEE 1) e;
- ⇒ Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 (SSEE 2).

O Sistema Elétrico Auxiliar é dividido em quatro subsistemas redundantes de 50% separados fisicamente e funcionalmente, de tal forma que com dois deles é possível efetuar o desligamento seguro do reator ou para controlar os diferentes tipos de acidentes postulados.

#### 4.3.1.4.1. Sistema de Suprimento Elétrico Normal – (SSEN)

O Sistema de Suprimento Elétrico Normal supre as cargas que são necessárias durante a operação normal da planta e também durante a partida e parada da mesma. É considerado um sistema classe E2 (“*Non-Safety Related*”), pois alimenta as cargas que são consideradas desnecessárias para o desligamento seguro do reator. Seu objetivo é aumentar a disponibilidade da planta, bem como reduzir a capacidade de curto-circuito nos barramentos dos diferentes trens.

É subdividido em quatro trens redundantes, parciais e independentes entre si (4 x 50%), que são supridos pelos enrolamentos secundários de dois transformadores auxiliares de alta tensão (BBT01 e BBT02). Esses transformadores são conectados ao Gerador Principal MK e aos transformadores do gerador (BAT01/02/03), e, são alimentados pelo próprio Gerador Principal MK durante o funcionamento normal, ou na partida e na parada, pela Rede Externa Principal de 525 KV.

No caso de perda da alimentação para o Sistema de Suprimento Elétrico Normal através dos transformadores auxiliares de alta tensão (BBT01 e BBT02), o mesmo poderá ser alimentado pela Rede Externa Reserva de 138 KV através do transformador da Rede Externa (BCT01). Esse processo de transferência de alimentação entre as redes externas é chamado de “Change-Over” e será detalhado no item 4.3.1.5.

O Sistema de Suprimento Elétrico Normal (SSEN) consiste dos seguintes componentes principais:

- Transformadores Auxiliares de Alta Tensão (76 MVA):

- ⇒ BBT01 e BBT02.

- Transformador da Rede Externa (76 MVA):
  - ⇒ BCT01.
  
- Painéis Principais (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 13,8 KV para cargas acima de 1.500 KW:
  - ⇒ BBA, BBB, BBC e BBD.
  
- Painéis Principais (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 4,16 KV para cargas entre 160 e 1.500 KW:
  - ⇒ BBE, BBF, BBG e BBH.
  
- Transformadores de baixa tensão de dois enrolamentos (9.000 KVA – 13.8 / 4.16 KV) cujos lados de alta tensão estão conectados aos Painéis de Distribuição de 13,8 KV, transformando esta tensão em 4,16 KV:
  - ⇒ BBT10 e BBT20, BBT30 e BBT40.
  
- Transformadores de baixa tensão de três enrolamentos (3.200 / 1600 / 1600 KVA – 13.8 / 0.48 / 0.48 KV) cujos lados de alta tensão estão conectados aos Painéis de Distribuição de 13,8 KV, transformando esta tensão em 480V:
  - ⇒ BFT10, BFT20, BFT30 e BFT40.
  
- Transformadores de baixa tensão de três enrolamentos (1.250 / 630 / 630 KVA – 13.8 / 0.4 / 0.23 KV) cujos lados de alta tensão estão conectados aos Painéis de Distribuição de 13,8 KV, transformando esta tensão em 400 / 230V e 230 / 133V:
  - ⇒ BHT10, BHT20, BHT30 e BHT40.
  
- Painéis Principais (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8) de Distribuição Geral de 480V para cargas até 160 KW:
  - ⇒ BFA, BFB, BFC, BFD, BFE, BFF, BFG e BFH.

- Painéis de Distribuição de 400 / 230V para os aquecedores do pressurizador (setores 1, 2, 3 e 4):
  - ⇒ BHE, BHF, BHG e BHH.
  
- Painéis (1, 2, 3 e 4) de Distribuição Geral de 230 / 133V para válvulas solenóides, instrumentação e controle, sistemas de iluminação e instalação geral:
  - ⇒ BHA, BHB, BHC e BHD.

Na tabela 4.1 encontram-se as cargas essenciais do Sistema de Suprimento Elétrico Normal (SSEN).

Tabela 4.1. Cargas Essenciais do SSEN.

<b>Localização</b>	<b>Descrição do Componente</b>	<b>Identificação</b>
Painel Principal (1) de Distribuição de 13,8 KV - BBA	Bomba de Refrigeração do Reator	JEB10AP001
	Bomba de Água de Refrigeração Principal	PAC30AP001
	Bomba de Condensado Principal	LCB10AP001
	Bomba de Água de Refrigeração Principal	PAC60AP001
Painel Principal (2) de Distribuição de 13,8 KV - BBB	Bomba de Refrigeração do Reator	JEB20AP001
	Bomba de Água de Refrigeração Principal	PAC20AP001
	Bomba de Condensado Principal	LCB20AP001
	Bomba de Água de Alimentação Principal	LAC20AP001
Painel Principal (3) de Distribuição de 13,8 KV - BBC	Bomba de Refrigeração do Reator	JEB30AP001
	Bomba de Água de Refrigeração Principal	PAC40AP001
	Bomba de Condensado Principal	LCB30AP001
	Bomba de Água de Alimentação Principal	LAC30AP001
Painel Principal (4) de Distribuição de 13,8 KV - BBD	Bomba de Refrigeração do Reator	JEB40AP001
	Bomba de Água de Refrigeração Principal	PAC10AP001
	Bomba de Água de Alimentação Principal	LAC10AP001
	Bomba de Água de Refrigeração Principal	PAC50AP001



Tabela 4.1. Cargas Essenciais do SSEN (continuação).

<b>Localização</b>	<b>Descrição do Componente</b>	<b>Identificação</b>
Painel Principal (1) de Distribuição de 4,16 KV - BBE	Bomba de Água Gelada	QKA50AP001
	Bomba do Circuito Fechado Convencional	PGC01AP001
	Ventilador de Ar	KLE01AN001
Painel Principal (2) de Distribuição de 4,16 KV - BBF	Bomba de Água de Refrigeração de Componentes	KAA21AP001
	Bomba de Fluido de Controle	MAX16AP001
	Bomba do Circuito Fechado Convencional	PGC02AP001
	Bomba de Óleo Auxiliar	MAV22AP001
Painel Principal (3) de Distribuição de 4,16 KV - BBG	Bomba do Circuito Fechado Convencional	PGC03AP001
	Bomba de Água Gelada	QKA53AP001
	Bomba de Água de Refrigeração de Componentes	KAA31AP001
Painel Principal (4) de Distribuição de 4,16 KV - BBH	Bomba de Água Gelada	QKA51AP001
	Bomba de Fluido de Controle	MAX16AP002
	Bomba de Óleo Auxiliar	MAV23AP001
	Ventilador de Ar	KLE02AN001

#### 4.3.1.4.2. Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 – (SSEE 1)

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 é requerido para suprir as cargas elétricas que são necessárias para o desligamento seguro do reator, remoção de calor residual e prevenção da liberação de material radioativo durante operação e durante condições de acidentes resultante de falhas dos sistemas importantes para a segurança. É, portanto, um sistema classe E1 (“*Safety Related*”).

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 é subdividido em quatro trens redundantes, parciais e independentes entre si, cada um com 50% de capacidade de suprimento da potência requerida para o cumprimento das funções de segurança. Os

trens são redundantes em virtude da consideração do caso de falha de uma redundância coincidente com o isolamento para manutenção de outra redundância, de modo que, sendo 4 trens de 50%, na indisponibilidade de dois trens pelas suposições acima, dois trens sejam suficientes para controlar um acidente postulado.

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 supre os consumidores conectados às barras BDA – BDD, fornecendo também a alimentação para as barras BM e consiste de quatro geradores diesel de emergência segundo o projeto 4 x 50% trens de resfriamento de emergência, ligados aos barramentos de 4,16 KV.

O Sistema Diesel de Emergência 1 consiste dos seguintes componentes principais:

- Grupos Geradores Diesel (6.600 KVA) do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e seus sistemas auxiliares associados:

  - ⇒ 1XK/XJ, 2XK/XJ, 3XK/XJ e 4XK/XJ, representados na modelagem do Capítulo 5 como A, B, C e D, respectivamente.

- Painéis (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 4,16 KV do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 para cargas acima de 160 KW:

  - ⇒ BDA, BDB, BDC e BDD.

- Transformadores de baixa tensão de três enrolamentos (3.200 / 1.600 / 1.600 KVA – 4.16 / 0.48 / 0.48KV) cujos primários estão conectados aos barramentos de 4,16 KV (BDA, BDB, BDC e BDD), transformando esta tensão em 480V:

  - ⇒ BMT10, BMT20, BMT30 e BMT40.

- Painéis (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8) de Distribuição de 480V do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 para cargas até 190 KW:

  - ⇒ BMA, BMB, BMC, BMD, BME, BMF, BMG e BMH.

- Transformadores auxiliares de baixa tensão de dois enrolamentos (550 KVA – 480 / 230 – 133V) cujos primários estão conectados aos Painéis de Distribuição de 480V (BMA, BMB, BMC e BMD), transformando esta tensão em 230 / 133V para suprimento das barras BMJ, BMK, BML e BMM.

⇒ BMT11, BMT21, BMT31 e BMT41.

- Painéis (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 230 / 133V do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 para válvulas solenóides e sistemas de iluminação de emergência:

⇒ BMJ, BMK, BML e BMM.

- Painéis (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 480V do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1:

⇒ 1XJY, 2XJY, 3XJY e 4XJY.

Na tabela 4.2 encontram-se as cargas essenciais do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 (SSEE 1).

Tabela 4.2. Cargas Essenciais do SSEE 1.

<b>Localização</b>	<b>Descrição do Componente</b>	<b>Identificação</b>
Painel (1) de Distribuição de 4,16 KV do Sistema de Emergência 1 - BDA	Bomba de Partida e Parada	LAJ10AP001
	Bomba de Injeção de Segurança	JND10AP001
	Máquina de Refrigeração	QKA01AN001
	Bomba de Água de Refrigeração de Componentes	KAA10AP001
	Bomba de Remoção de Calor Residual	JNA10AP001
	Bomba de Refrigeração de Serviço de Segurança	PEC10AP001
	Ventilador de Ar de Recirculação	KLA33AN001

Tabela 4.2. Cargas Essenciais do SSEE 1 (continuação).

<b>Localização</b>	<b>Descrição do Componente</b>	<b>Identificação</b>
Painel (2) de Distribuição de 4,16 KV do Sistema de Emergência 1 - BDB	Bomba de Injeção de Alta Pressão	KBA32AP001
	Bomba de Injeção de Segurança	JND20AP001
	Máquina de Refrigeração	QKA02AN001
	Bomba de Água de Refrigeração de Componentes	KAA20AP001
	Bomba de Remoção de Calor Residual	JNA20AP001
	Bomba de Refrigeração de Serviço de Segurança	PEC20AP001
	Ventilador de Ar de Recirculação	KLA34AN001
Painel (3) de Distribuição de 4,16 KV do Sistema de Emergência 1 - BDC	Bomba de Injeção de Alta Pressão	KBA33AP001
	Bomba de Injeção de Segurança	JND30AP001
	Máquina de Refrigeração	QKA03AN001
	Bomba de Água de Refrigeração de Componentes	KAA30AP001
	Bomba de Remoção de Calor Residual	JNA30AP001
	Bomba de Refrigeração de Serviço de Segurança	PEC30AP001
	Ventilador de Ar de Recirculação	KLA32AN001
Painel (4) de Distribuição de 4,16 KV do Sistema de Emergência 1 - BDD	Bomba de Injeção de Alta Pressão	KBA31AP001
	Bomba de Injeção de Segurança	JND40AP001
	Máquina de Refrigeração	QKA04AN001
	Bomba de Partida e Parada	LAJ20AP001
	Bomba de Água de Refrigeração de Componentes	KAA40AP001
	Bomba de Remoção de Calor Residual	JNA40AP001
	Bomba de Água de Serviço Fechado de Segurança	PEC40AP001
	Ventilador de Ar de Recirculação	KLA31AN001

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 conecta-se aos quatro trens do Sistema de Suprimento Elétrico Normal por meio de dois disjuntores em série em

cada trem. Esses disjuntores são chamados de disjuntores de acoplamento e são intertravados de modo que os disjuntores BBE – BBH20GS001 do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 só podem ser fechados se os disjuntores BDA – BDD01GS001 do Sistema de Suprimento Elétrico Normal já estiverem fechados. Se os disjuntores BDA – BDD01GS001 forem abertos manualmente ou pela proteção de sobrecorrente, os disjuntores BBE – BBH20GS001 são igualmente abertos pelo intertravamento.

Os disjuntores de acoplamento BBE – BBH20GS001 e os disjuntores dos geradores diesel (1 – 4XKA01GS001) são intertravados de tal maneira que se os disjuntores BBE – BBH20GS001 forem fechados, os disjuntores (1 – 4XKA01GS001) deverão estar abertos e vice-versa. Esse intertravamento só é cancelado durante operações de sincronização e durante testes de rotina em paralelo com o Sistema Elétrico Auxiliar.

Cada trem do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 consiste de barramentos de diferentes níveis de tensão para o suprimento das cargas de segurança. As barras de distribuição de emergência 1 (1 – 4XJY) são supridas pelos barramentos BME – BMH do respectivo trem.

Não existem interconexões entre barramentos de trens diferentes do SSEE 1, exceto uma interconexão com os barramentos BRA, BRB, BRC e BRD do Sistema *No-Break* de Distribuição de Corrente Alternada e os barramentos BMJ, BMK, BML e BMM do SSEE 1.

O controle de corrente contínua para abertura de disjuntores é realizado por um par de barramentos de 220Vcc (BVA – BVD) através de diodos de acoplamento.

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 pode ser alimentado pela Rede Externa (Principal de 525 KV ou Reserva de 138 KV), ou pelo Gerador Principal MK. Todas as operações entre a Rede Externa e o Sistema Interno Auxiliar, ocorrem dentro do Sistema de Suprimento Elétrico Normal.

Em caso de falha simultânea de todas as fontes externas e do Sistema de Suprimento Elétrico Normal, o Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 é demandado a operar após 2 segundos de mínima tensão ou frequência nas barras de emergência através de um comando de partida dado aos geradores diesel de emergência pelo Sistema de Proteção do Reator.

As cargas de segurança supridas pelos barramentos de emergência são desconectadas e reconectadas por sinais do Sistema de Proteção do Reator em casos de acidentes internos com perda simultânea do suprimento através do Sistema de Suprimento Elétrico Normal. Se o suprimento através do SSEN falhar sem acidentes adicionais, o Sistema de Proteção do Reator desconecta as cargas e envia sinais de liberação seqüenciados para a reconexão das cargas.

#### 4.3.1.4.3. Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 – (SSEE 2)

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 é requerido para suprir as cargas elétricas que são necessárias para assegurar o desligamento seguro do reator em caso de impactos externos (EVA), bem como em caso de falha simultânea de todas as fontes externas e do Sistema de Suprimento Elétrico Normal. Também serve para monitorar a bomba de água de alimentação de emergência. O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 é demandado a operar após 2 segundos de mínima tensão ou frequência nas barras de emergência através de um comando de partida dado aos geradores diesel de emergência pelo Sistema de Proteção do Reator.

Da mesma maneira que os Sistemas anteriores, o Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 é subdividido em quatro trens redundantes, parciais e independentes entre si, cada um com 50% de capacidade de suprimento da potência requerida para o cumprimento das funções de segurança (4 x 50%).

Os disjuntores de acoplamento são intertravados de modo que os disjuntores BFE – BFH02GS001 do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 só podem ser fechados se os disjuntores BNA – BND02GS001 ou BFE – BFH02GS002 já estiverem fechados. Se ambos os disjuntores BNA – BND02GS001 e BFE – BFH02GS002 forem abertos manualmente ou pela proteção de sobrecorrente, os disjuntores BFE – BFH02GS001 são igualmente abertos pelo intertravamento.

Os disjuntores dos geradores diesel de emergência (5 – 8XKA01GS001), só podem ser fechados se os disjuntores BFE – BFH02GS001 já estiverem abertos. Este intertravamento só é cancelado durante operações de sincronização e durante testes de rotina em paralelo com a alimentação pelo Sistema de Suprimento Elétrico Normal.

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2, do mesmo modo que o Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1, permanece em estado de prontidão,

ou seja, todos os critérios importantes para a partida e para a operação do sistema são continuamente monitorados. Os disjuntores dos geradores diesel de emergência do SSEE 2 (5 – 8 XKA01GS001) permanecem abertos em operação normal e os Painéis (9, 10, 11 e 12) de Distribuição de 480V do SSEE 2 (BNA – BND) são alimentados através dos disjuntores de acoplamento BNA – BND02GS001 do Sistema de Suprimento Elétrico Normal e BFE – BFH02GS001 do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2.

Os Painéis (9, 10, 11 e 12) de Distribuição de 480V do SSEE 2 são monitorados pelo Sistema de proteção do Reator, da mesma forma que os Painéis (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 4,16 KV do SSEE 1. Se em algum momento, o nível de tensão desses barramentos for menor que um mínimo permitido ( $0.8 \times$  tensão do barramento) e a frequência nesses barramentos for menor que 56,7 Hz, um comando de partida é dado pelo Sistema de Proteção do Reator para os respectivos geradores diesel dos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2 depois de um período de 2 segundos de mínima tensão nas barras de emergência.

O Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 é isolado do Sistema de Suprimento Elétrico Normal pela abertura dos disjuntores de acoplamento BFE – BFH02GS001 e BNA – BND02GS001. Com isso, os disjuntores 5 – 8XKA01GS001 podem ser fechados e as cargas são sequencialmente reconectadas pelo Sistema de Proteção do Reator.

O Sistema Diesel de Emergência 2 consiste dos seguintes componentes principais:

- Grupos Geradores Diesel (1.050 KVA) do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 e seus sistemas auxiliares associados:

  - ⇒ 5XK/XJ, 6XK/XJ, 7XK/XJ e 8XK/XJ, representados na modelagem do Capítulo 5 como E, F, G e H, respectivamente.

- Painéis (9, 10, 11 e 12) de Distribuição de 480V do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 para cargas de baixa tensão:

  - ⇒ BNA, BNB, BNC e BND.

- Painéis (13, 14, 15 e 16) de Distribuição de 480V do Sistema de Distribuição de 480V para válvulas de isolamento:

⇒ BNE, BNF, BNG e BNH.

Na tabela 4.3 encontram-se as cargas essenciais do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 (SSEE 2).

Tabela 4.3. Cargas Essenciais do SSEE 2.

<b>Localização</b>	<b>Descrição do Componente</b>	<b>Identificação</b>
Painéis (9, 10, 11 e 12) de Distribuição de 480V (BNA – BND)	Bomba de Refrigeração da Piscina de Combustíveis	FAK10AP001
	Bomba de Emergência de Refrigeração de Componentes	KAA11AP001
	Bomba de Água de Refrigeração de Emergência do Serviço de Segurança	PEC50AP001
	Bomba de Água de Refrigeração de Emergência do Serviço de Segurança	PEC52AP001
	Bomba de Injeção de Boro	JDH10AP001
	Ventiladores de Circulação do Sistema de Ventilação	SAL10AN001
	Ventiladores de Circulação do Sistema de Ventilação	SAL10AN002
	Ventiladores de Circulação do Sistema de Ventilação	SAL10AN003
	Ventiladores de Circulação do Sistema de Ventilação	SAL10AN004
	Ventiladores de Circulação do Sistema de Ventilação	SAL10AN005
	Ventiladores de Circulação do Sistema de Ventilação	SAL10AN006
	Ventiladores de Circulação do Sistema de Ventilação	SAL10AN007



#### 4.3.1.5. Transferência de Alimentação entre as Redes Externas

A transferência de Alimentação entre as Redes Externas (“Change-Over”) é a transferência da alimentação dos Painéis Principais (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 13,8 KV através dos transformadores auxiliares de alta tensão BBT01 e BBT02 para a alimentação através do transformador da Rede Externa BCT01 e vice-versa.

Os Painéis Principais (1, 2, 3 e 4) de Distribuição de 13,8 KV – BBA, BBB, BBC e BBD são supridos em todos os modos operacionais normais, pela Rede Externa principal de 525 KV ou pelo Gerador Principal MK, através de dois transformadores auxiliares de alta tensão (BBT01 e BBT02). Entende-se por modos operacionais normais, a partida e a parada da unidade, bem como as operações sob todas as condições de carga possíveis permitidas.

Uma perda total da alimentação auxiliar através dos transformadores auxiliares de alta tensão (BBT01 e BBT02), não causam de maneira imediata a partida dos geradores diesel de emergência, antes a usina tenta efetuar uma transferência automática da alimentação auxiliar para a Rede Externa Reserva de 138 KV, através do transformador da Rede Externa (BCT01), para conseguir retirar a alimentação necessária ao consumo próprio.

Esta transferência de alimentação auxiliar é atuada automaticamente através de um dos 3 seguintes critérios em lógica “ou”:

- Tensão no barramento de 25 KV  $< 0,84 U_N$  (com retardo de 5 segundos);
- Tensão no barramento de 25 KV  $< 0,70 U_M$  (com retardo de 0,5 segundos) e;
- Atuação da proteção, se esta provocar a perda de alimentação ao consumo próprio.

A transferência automática da alimentação auxiliar para a Rede Externa Reserva de 138 KV é efetuada em pares aos barramentos de alimentação de emergência, onde é colocada a premissa que a tensão na Rede Externa seja  $> 0,8 U_N$ .

Como o transformador da Rede Externa Reserva de 138 KV (BCT01) não é dimensionado para a cobertura da carga total da alimentação auxiliar (ele corresponde em relação à carga a ser transferida, a somente um dos transformadores da alimentação auxiliar), vários consumidores precisam ser desligados na ativação da transferência. Entre eles estão todas as bombas principais de refrigeração do reator e todas as bombas de água de alimentação principal.

Com o desligamento das BRRs (bombas de refrigeração do reator), isto é, número de bombas em operação  $< 3$ , é ativado o RESA, e como consequência também o TUSA.

No processo de transferência automática a tensão no barramento não cai instantaneamente para o valor zero, após o desligamento (*trip*) do disjuntor de entrada, através do qual a alimentação ao consumo próprio estava sendo realizada. O valor da tensão residual e sua frequência decaem conforme uma função específica. Esta função depende do tipo e do tamanho dos consumidores em processo de desligamento. O fechamento do outro disjuntor de entrada, associado a alimentação através da Rede Externa de 138 KV, via transformador da Rede Externa (BCT01), depende do vetor diferença entre a tensão residual presente no barramento do consumo próprio e a tensão da Rede Externa. Este vetor diferença não deve ultrapassar a um valor especificado.

No processo de transferência, assim que o disjuntor de entrada é desligado, a unidade de transferência automática rápida mede a tensão residual no barramento e calcula a curva de decaimento dessa tensão. Com a definição do comportamento da tensão residual o aparelho compara com a tensão da Rede Externa, no alimentador de entrada do barramento a ser conectado com a Rede Externa. Assim, é determinado o instante correto e mais cedo para a realização da transferência. Usualmente a transferência rápida é efetuada em aproximadamente 150 ms após a excitação do aparelho. Se a transferência rápida falhar para um ou mais barramentos (trens) do consumo próprio, deverá ser realizada então a transferência longa.

Na transferência longa todas as cargas motrizes são desligadas e posteriormente ligadas através de um programa de religamento gerenciado através de uma lógica chamada ISKAMATIC. Com isto, uma sobrecarga no transformador da Rede Externa é evitada.

Em caso de sucesso com a transferência longa, isto é, no mais tardar aproximadamente 1,2 s após a ativação da transferência, os barramentos de consumo próprio estão alimentados com tensão e a partida dos geradores diesel de emergência não se torna necessária. Para que o transformador da Rede Externa não seja sobrecarregado, os consumidores desligados são novamente ligados escalonadamente.

Um insucesso na transferência lenta ou longa ao mesmo tempo para todos os barramentos de consumo próprio de 13,8 KV só é possível, quando atuar a proteção do bloco na região dos transformadores da Rede Externa Reserva ou em caso de falta da Rede Externa. Para o domínio do caso de alimentação de emergência daí ocasionado, o

Sistema de Proteção do Reator (JR) parte os geradores diesel de emergência dos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2, com os quais se alimentará agora somente os consumidores da rede de emergência 1 (Rede D1) e 2 (Rede D2).

#### 4.3.1.6. Modo de Suprimento de Emergência

Os geradores diesel de emergência do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 alimentam os Painéis de Distribuição de 4,16 KV (BDA – BDD) a que estão conectados. Em caso de falha da alimentação normal para uma barra de emergência 1, ou que seja produzido algum distúrbio na tensão ou frequência da mesma, o gerador diesel correspondente será partido a fim de restituir a tensão na barra.

A partida automática dos geradores diesel é produzida mediante um sinal do Sistema de Proteção do Reator, gerado por mínima tensão ou frequência na barra de emergência 1 correspondente.

Dois segundos após ser produzida mínima tensão nas barras BDA – BDD, os disjuntores de interconexão entre as barras BBE e BDA são abertos, isolando o Sistema de Suprimento Elétrico Normal do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1. As cargas do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 são então desconectadas.

Os sinais do Sistema de Proteção implicados na partida e conexão dos geradores diesel de emergência do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1, são os seguintes:

**JR91** – Sinal de partida dos geradores diesel de emergência do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1: realiza a partida dos geradores diesel de emergência 1 e de seus sistemas auxiliares. Esses sistemas auxiliares são os seguintes: Sistema de Combustível – XJN; Sistema de Óleo Lubrificante – XJV; Sistema de Ar Comprimido – XJP; Sistema de Ar de Combustão e Gás de Escape – XJQ e XJR e Sistema de Refrigeração – XJG. Esses sistemas não serão detalhados neste trabalho, pois, não serão consideradas as falhas dos geradores em função de falhas desses sistemas auxiliares, uma vez que para efeitos da modelagem do Capítulo 5, considera-se que inicialmente todos os geradores estejam em funcionamento.

**JR92** – Sinal de acoplamento dos geradores diesel de emergência 1: abre os disjuntores de alimentação elétrica desde as barras normais para as barras de emergência

1 e realiza o acoplamento dos geradores diesel às suas barras (fechando os disjuntores 1 – 4XKA01GS001).

**JR93** – Sinal de desconexão dos consumidores das barras de emergência 1 e programa de reconexão de cargas (DLS): os geradores diesel do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 alimentam os Painéis de Distribuição de 480V (BNA – BND) a que estão conectados. Em caso de falha da alimentação normal para uma barra de emergência 2, ou de que seja produzido algum distúrbio na tensão ou frequência da mesma, o gerador diesel correspondente será partido a fim de restituir a tensão na barra.

A partida automática dos geradores diesel do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 é produzida mediante um sinal do Sistema de Proteção do Reator, gerado por mínima tensão ou frequência na barra de emergência 2 correspondente.

Dois segundos após ser produzida a mínima tensão nas barras BNA – BND, os disjuntores de interconexão entre as barras BFE e BNA são abertos, isolando o Sistema de Suprimento Elétrico Normal do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2. As cargas do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência e são desconectadas.

Os sinais do Sistema de Proteção implicados na partida e conexão dos geradores diesel de emergência do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2, são os seguintes:

**JR71** – Sinal de partida dos geradores diesel de emergência do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2: realiza a partida dos geradores diesel de emergência 2 e de seus sistemas auxiliares. Esses sistemas auxiliares são os seguintes: Sistema de Combustível – XJN; Sistema de Óleo Lubrificante – XJV; Sistema de Ar Comprimido – XJP; Sistema de Ar de Combustão e Gás de Escape – XJQ e XJR e Sistema de Refrigeração – XJG. Esses sistemas não serão detalhados neste trabalho, pois, não serão consideradas as falhas dos geradores em função de falhas desses sistemas auxiliares, uma vez que para efeitos da modelagem do Capítulo 5, considera-se que inicialmente todos os geradores estejam em funcionamento.

**JR72** – Sinal de acoplamento dos geradores diesel de emergência 2: abre os disjuntores de alimentação elétrica desde as barras normais para as barras de emergência

2 e realiza o acoplamento dos geradores diesel às suas barras (fechando os disjuntores 5 – 8XKA01GS001).

**JR73** – Sinal de desconexão dos consumidores das barras de emergência 2 e programa de reconexão de cargas (EDLS).

Os grupos geradores diesel de emergência 1 e 2 partem pelos sinais de proteção do reator JR91 e JR71 e os disjuntores dos geradores de emergência são fechados e os mesmos estão aptos a receberem carga pelos sinais JR92 e JR72, respectivamente. As cargas dos sistemas de emergência 1 e 2 são alimentadas independentemente por seus respectivos grupos geradores diesel em todas as 4 redundâncias.

#### 4.3.1.6.1. Estágios de Partida dos Geradores Diesel

Para garantir uma aceleração livre dos sistemas de geração diesel de emergência 1 e 2, todas as cargas de emergência são desligadas dois segundos após o atendimento dos critérios de perda do suprimento pelo Sistema Elétrico Auxiliar:

- Tensão no barramento de 4,16 KV (BDA – BDD)  $< 0.8 U_N$  (3.2 KV);
- Frequência nos barramentos de 4,16 KV (BDA – BDD)  $< 0.95 FN$  (56.7Hz);
- Tensão no barramento de 480V (BNA – BND)  $< 0.8 UN$  (352V);
- Frequência nos barramentos de 480V (BNA – BND)  $< 0.945 FN$  (56.7Hz).

Os geradores diesel de emergência dos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2 recebem sinais de comando de partida simultaneamente.

Os sinais de reconexão das cargas são escalonados em ambos os sistemas de suprimento de emergência através dos programas de carregamento do diesel, DLS (Diesel Load Step) para as cargas do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e EDLS (Emergency Diesel Load Step) para as cargas do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2, de tal forma que não ocorra sobrecarga neste sistemas durante o seqüenciamento de partida de cargas.

No caso do modo de suprimento de emergência e acidentes internos onde o suprimento de emergência seja necessário, as cargas importantes na mitigação de um

possível acidente são alimentadas pelos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2. Estas cargas são desligadas dois segundos após o aparecimento do critério de perda do Suprimento Elétrico Auxiliar (ou seja, mínima tensão nas barras de emergência). Após 12 segundos do aparecimento desse critério, o disjuntor do gerador é fechado e então o barramento é energizado, podendo assumir cargas.

Para o caso de eventos externos com perda do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1, somente os consumidores alimentados pelo Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2 podem ser utilizados para controlar o acidente. As cargas são também desligadas dois segundos após o critério de perda do Suprimento Elétrico Auxiliar e os períodos para a liberação da reconexão das cargas, corresponde aos períodos estipulados para as situações de suprimento de emergência com acidentes internos.

#### 4.3.1.6.2. Estágios de Carga dos Geradores Diesel - DLS

Sinal **JR92** – Com o fechamento do disjuntor do gerador: com o fechamento dos disjuntores dos geradores diesel, os painéis de distribuição de emergência (BDA – BDD) ficam aptos para receberem carga. Com o fechamento dos disjuntores dos transformadores BMT10 – BMT40GT002, os painéis de distribuição de emergência de 480V (BMA – BMD) ficam aptos para receberem carga. Os retificadores de 220Vcc são alimentados por estes barramentos.

Sinal **JR93 – DLS 1** – (5 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): com o fechamento dos disjuntores dos transformadores BMT10 – BMT40GT002, os painéis de distribuição de emergência de 480V (BME – BMH) ficam aptos para receberem carga. As bombas de água de refrigeração do serviço de segurança recebem sinal de liberação para entrarem em funcionamento.

Sinal **JR93 – DLS 2** – (10 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação das bombas de refrigeração de componentes KAA10 – KAA40AP001. A entrada dessas bombas em operação é necessária para refrigerar as bombas de injeção de segurança, as bombas de remoção de calor residual e as bombas de injeção de alta pressão.

Sinal **JR93** – **DLS 3** – (15 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação das bombas de partida e parada LAJ10/20AP001, alimentadas pelos barramentos de 4,16 KV.

Sinal **JR93** – **DLS 4** – (20 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação das bombas de injeção de segurança JND10 – JND40AP001.

Sinal **JR93** – **DLS 5** – (25 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação das bombas de injeção de segurança JNA10 – JNA40AP001.

Sinal **JR93** – **DLS 6** – (30 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação das bombas de injeção de alta pressão KBA31/32/33AP001 do Sistema de Controle Volumétrico.

Sinal **JR93** – **DLS 7** – (35 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação dos ventiladores do Sistema de Recirculação de Ar KLA31 – KLA34AP001.

Sinal **JR93** – **DLS 8** – (300 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação das máquinas de refrigeração QKA01 – QKA04AN001 e a terceira bomba de refrigeração da piscina de elementos combustíveis FAK20AP001.

#### 4.3.1.6.3. Estágios de Carga dos Geradores Diesel - EDLS

Sinal **JR72** – Com o fechamento do disjuntor do gerador: com o fechamento do disjuntor do gerador no programa EDLS de carregamento dos geradores diesel do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2, ou seja, com a atuação do sinal JR72, 12 segundos após a identificação da falta de alimentação elétrica, sinais de mínima tensão  $< 0.8 U_N$  (352V) ou subfrequência  $< 0.945 F_N$  (56Hz), nos barramentos BNA – BND, ocorre a liberação para a entrada das bombas de recirculação de água desmineralizada LAR14 – LAR44AP001.

Sinal **JR73** – **EDLS 1** – (5 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação para a entrada das cargas, bombas de água de alimentação de

emergência PEC50/52/80/82AP001 e das bombas de boração adicionais JDH10 – JDH41AP001.

Sinal **JR73 – EDLS 2** – (30 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação para os ventiladores da sala do diesel SAL10 – SAL40AN004.

Sinal **JR73 – EDLS 3** – (45 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação das bombas de refrigeração da piscina de elementos combustíveis FAK10 e FAK40AP001 nos subsistemas 1 a 4.

Sinal **JR73 – EDLS 4** – (180 segundos após o fechamento do disjuntor do gerador): liberação para a entrada das máquinas de refrigeração SAL10 – 40AN003 no prédio de alimentação de emergência ULB.

#### **4.4. Conclusão**

Neste Capítulo, com base nas referências FSAR (2005) e CFOL (1998), foram apresentados de maneira simplificada o funcionamento e a organização do Sistema de Suprimento de Energia Elétrica (SSEE) da Central Nuclear de Angra 2, com o objetivo principal de facilitar o entendimento do funcionamento dos grupos geradores diesel de emergência da mesma que serão modelados no Capítulo 5.



## Capítulo 5

### – Modelagem dos Geradores Diesel de Emergência –

#### 5.1. Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a modelagem para os geradores diesel de emergência da Central Nuclear de Angra 2, utilizando-se o Método das Variáveis Suplementares.

Dentre os processos que podem ser utilizados na representação da evolução de um sistema, destacam-se, no presente estudo, os markovianos e os não markovianos.

Processos markovianos são utilizados na representação de sistemas que estão no seu período de vida útil, cuja taxa de falha pode ser representada por distribuições exponenciais. Sistemas que já entraram no seu período de envelhecimento são representados por processos não-markovianos, cujos tempos de falha não podem ser distribuídos exponencialmente. Para sistemas não-markovianos, a idade do sistema é um parâmetro de grande relevância.

O sistema que será modelado neste capítulo será tratado como um sistema não-markoviano, apesar de ainda estar em seu período de vida útil. A idéia é tratar como se estivesse sob envelhecimento um sistema que ainda é novo, a fim de possibilitar que as probabilidades de falhas futuras sejam preditas.

Desta forma, o objetivo dessa análise é simular o envelhecimento dos geradores diesel, para que, de acordo com as idades a eles atribuídas, possa ser possível prever o comportamento desses equipamentos no que diz respeito às falhas, quer sejam por falta de manutenção ou por manutenção inadequada. Isso possibilita, que políticas de manutenção mais otimizadas possam ser adotadas no presente, a fim de que essas probabilidades de falha possam ser reduzidas no futuro, em função dessa otimização da manutenção, possibilitando dessa forma, uma melhoria na avaliação da extensão de sua vida útil.

Para esta análise, utiliza-se o Método das Variáveis Suplementares, que é um método exato, sem aproximações, além de ser um dos métodos mais diretos para lidar com sistemas não-markovianos.

## 5.2. Considerações sobre o Modelo Proposto

De acordo com o descrito no capítulo anterior sobre o Sistema Elétrico, a Central Nuclear de Angra 2 dispõe de quatro grupos geradores diesel de emergência de 4,16 KV, pertencentes ao Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1, e, de outros quatro geradores diesel de emergência de 480V, pertencentes ao Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2, cada um deles conectado aos seus respectivos barramentos através de disjuntores. Esses geradores são física e eletricamente independentes entre si, cada um deles com capacidade para suprir as cargas associadas à sua respectiva redundância.

De acordo com o Critério de Falha Única, os equipamentos da planta que cumprem funções de segurança devem estar repetidos de tal forma que, ocorrendo a falha de uma redundância, coincidente com o isolamento para manutenção de uma outra, ainda estejam disponíveis duas redundâncias para o controle e mitigação de um acidente. O Sistema Elétrico da C. N. de Angra 2, segue este mesmo critério, possuindo 4 trens redundantes de 50% de capacidade de suprimento cada um deles, de modo que, com dois deles, é possível efetuar o desligamento seguro do reator.

Como condições de funcionamento conforme o estabelecido pelas especificações técnicas (FSAR, 2005), no caso de alimentação elétrica de emergência, faz-se necessário que pelo menos dois, dos quatro geradores diesel que alimentam a cadeia de refrigeração de emergência, estejam em operação para controlar um possível acidente e conduzir a central a uma condição de desligamento seguro.

Para o presente estudo, considera-se como hipótese, que no instante inicial os oito geradores diesel dos dois sistemas de suprimento elétrico de emergência estejam em funcionamento. Considera-se como falha, a perda de mais de 2 geradores, ou seja, a falha de 3 ou de 4 geradores para cada sistema de suprimento elétrico de emergência, pois, essa situação deixaria a central dentro das condições de limites de operação estabelecidas pelas Especificações Técnicas.

As taxas de falha que foram consideradas para os geradores diesel em todos os casos simulados são apresentadas no Capítulo 6 e foram obtidas através do estudo realizado por CROSSETTI (2006) para a Central Nuclear de Angra 1, que já encontra-se na segunda metade de seu período de vida útil. Essa consideração deve-se ao fato de que a Central Nuclear de Angra 2 é uma usina ainda nova, com apenas 6 anos de

operação comercial, com seus equipamentos ainda funcionando de acordo com o previsto, o que tornou dispensável a determinação de uma taxa de falha sob o ponto de vista do envelhecimento. As taxas de reparo foram consideradas com base nos prazos estipulados pelas Especificações Técnicas supondo que os geradores funcionam durante um dia por ano.

Considera-se que não há restrições quanto ao número de equipes de reparo, pois assume-se que o prazo estabelecido pelas Especificações Técnicas, como pode ser observado na Tabela 5.1 deve ser cumprido independentemente do número de equipes de reparo disponíveis, sob pena de entrarem nas Condições Limites de Operação.

Tabela 5.1. Condições de Falha e Ações de Reparo para os Geradores Diesel de acordo com as Especificações Técnicas.

<i>Condição</i>	<i>Ação Requerida</i>	<i>Tempo para conclusão da ação</i>
1 gerador inoperável	Recuperar o gerador falho.	14 dias
	Testar a próxima redundância caso o gerador não seja recuperado dentro de 3 dias.	Imediatamente
2 geradores inoperáveis	Recuperar pelo menos um dos geradores falhos.	24 horas
	Não é necessário recuperar todos os geradores. Porém, pelo menos um gerador deve ser recuperado. Então, a unidade deixa essa condição e volta a permanecer na condição anterior.	-
3 ou mais geradores inoperáveis	Suspender toda e qualquer ação que possa resultar no desligamento da unidade, bem como mudança de modo de operação ou redução de potência.	Imediatamente
	Iniciar as ações necessárias para recuperar os geradores diesel de modo que pelo menos dois sejam recuperados.	Imediatamente

O sistema que será modelado está representado no Capítulo 4, pelas Figuras 4.1b e 4.1c. Esse sistema gera um diagrama de estados com 12 estados para cada grupo de quatro geradores diesel dos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2.

Para a construção do diagrama de transição de estados representado na Figura 5.1, foram identificados inicialmente 16 estados para cada grupo de quatro geradores, dos quais 4 estados para cada grupo de geradores foram considerados como um único estado, pois representavam o mesmo evento, ou seja, a falha de mais de dois geradores.

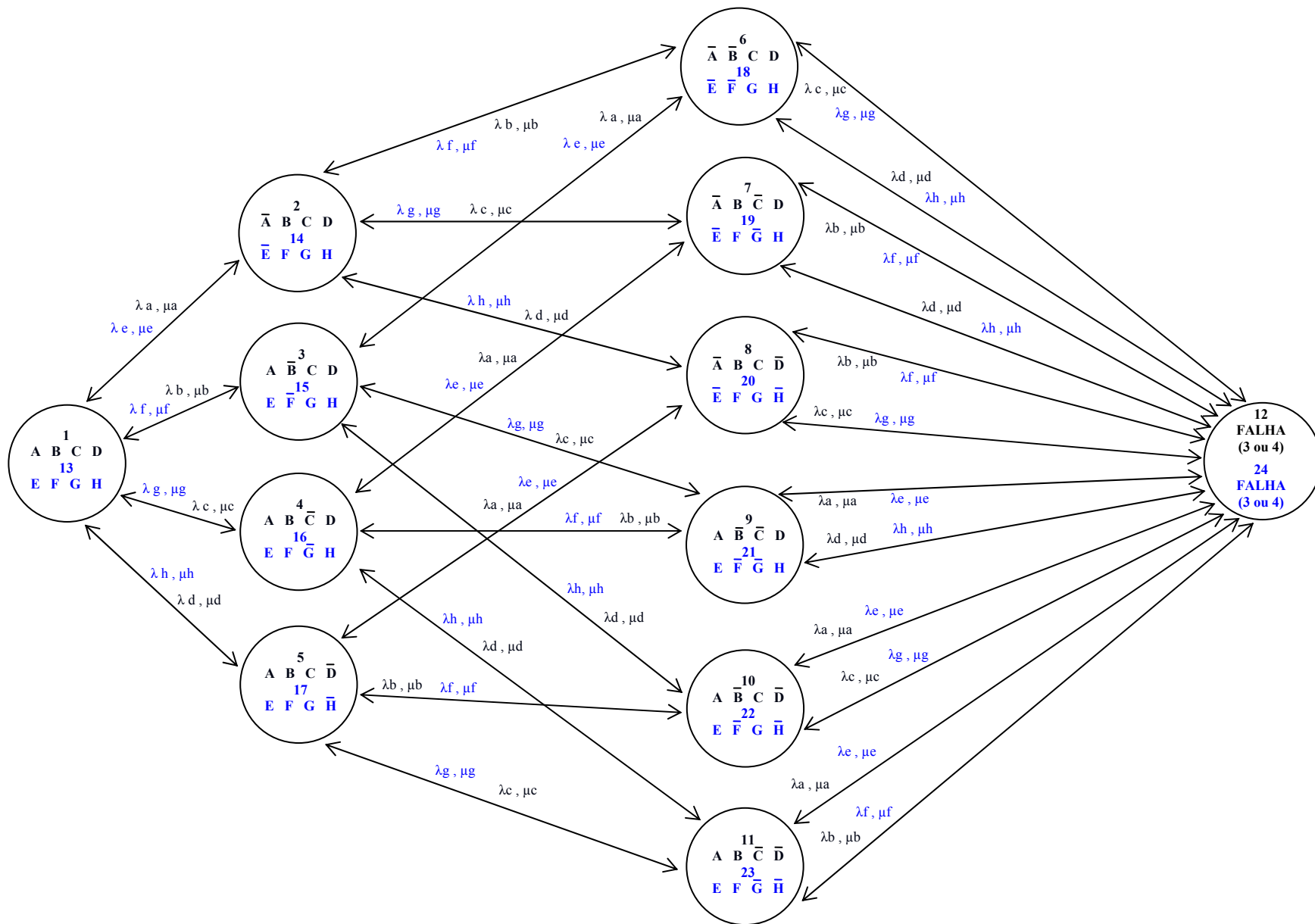


Figura 5.1. Diagrama de Transição de Estados para os Geradores Diesel de Emergência dos SSEE 1 e SSEE 2.

Esses quatro estados foram considerados como um único estado e estão representados no diagrama da Figura 5.1 pelo estado 12 / 24 chamado de estado falho e que representa a falha de 3 ou quatro geradores, considerando-se cada Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência individualmente.

De acordo com o que pode ser observado na Figura 5.1, cada estado é representado por um círculo e os números no alto de cada grupo das quatro letras que representam os geradores é um identificador simbólico do estado em que o sistema se encontra. Dentro de cada círculo também estão mostradas as condições de funcionamento dos geradores, de acordo com a convenção mostrada na Tabela 5.2. Os geradores diesel de emergência 1XK/XJ, 2XK/XJ, 3XK/XJ, 4XK/XJ, 5XK/XJ, 6XK/XJ, 7XK/XJ e 8XK/XJ são representados respectivamente pelas letras A, B, C, D, E, F, G e H apenas para facilitar e simplificar a representação do diagrama de transição de estados. A letra A indica gerador diesel 1XK/XJ em funcionamento, enquanto que a letra  $\bar{A}$  significa que o gerador diesel está falho. Esta mesma metodologia aplica-se aos demais geradores.

Utilizou-se o mesmo diagrama para a representação dos estados dos dois sistemas de suprimento elétrico de emergência.

Tabela 5.2. Representação dos Geradores Diesel e de seus Estados no Diagrama de Transição de Estados.

<i>Grupo Gerador Diesel</i>	<i>Representação no Diagrama de Transição de Estados (Estado Operacional)</i>	<i>Representação no Diagrama de Transição de Estados (Estado Falho)</i>
1 XK / XJ	<i>A</i>	$\bar{A}$
2 XK / XJ	<i>B</i>	$\bar{B}$
3 XK / XJ	<i>C</i>	$\bar{C}$
4 XK / XJ	<i>D</i>	$\bar{D}$
5 XK / XJ	<i>E</i>	$\bar{E}$
6 XK / XJ	<i>F</i>	$\bar{F}$
7 XK / XJ	<i>G</i>	$\bar{G}$
8 XK / XJ	<i>H</i>	$\bar{H}$

Uma outra notação adotada com a finalidade de simplificar o diagrama de transição de estados, tornando melhor a visualização das transições, consistiu em representar as direções das taxas de falha e de reparo com uma única seta de dois sentidos.

De acordo com PINHO (2000), para modelar o sistema proposto utilizando variáveis suplementares devem ser observadas as seguintes regras:

i) As equações de variáveis suplementares com as taxas variando com o tempo devem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial p_r}{\partial x} + \frac{\partial p_r}{\partial t} = -(\text{todas as taxas que saem}) p_r(x,t) \quad (5.1)$$

ii) As condições iniciais  $p(0,t)$  são formalizadas, e, devem ser iguais a todas as probabilidades que chegam ao estado. As condições de contorno  $p_1(x,0)$ , devem ser iguais a função densidade de probabilidade de falha 'f(x)', de todos os geradores funcionais, e,  $p_i(x,0)$  igual a zero para os outros estados.

As equações de variáveis suplementares associadas ao diagrama de transição de estados da Figura 5.1 são as seguintes:

$$\frac{\partial p_1(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p_1(x,t)}{\partial t} = -4\lambda(x)p_1(x,t) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial p_r(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p_r(x,t)}{\partial t} = -[3\lambda(x) + \mu_1(x)]p_r(x,t) \quad r = 2, \dots, 5 \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial p_r(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p_r(x,t)}{\partial t} = -(2\lambda(x) + 2\mu_2(x))p_r(x,t) \quad r = 6, \dots, 11 \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial p_{12}(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p_{12}(x,t)}{\partial t} = -12\mu_3(x)p_{12}(x,t) \quad (5.5)$$

$$p_1(x,0) = 4\lambda(x) \exp\left(-4 \int_{t=0}^{t=x} \lambda(t) dt\right) \quad (5.6)$$

$$p_r(x,0) = 0 \quad r = 2, \dots, 12 \quad (5.7)$$

$$p_1(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_1(x) (p_2(x,t) + p_3(x,t) + p_4(x,t) + p_5(x,t)) dx \quad (5.8)$$

$$p_2(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) p_1(x,t) dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x) (p_6(x,t) + p_7(x,t) + p_8(x,t)) dx \quad (5.9)$$

$$p_3(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) p_1(x,t) dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x) (p_6(x,t) + p_9(x,t) + p_{10}(x,t)) dx \quad (5.10)$$

$$p_4(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) p_1(x,t) dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x) (p_7(x,t) + p_9(x,t) + p_{11}(x,t)) dx \quad (5.11)$$

$$p_5(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) p_1(x,t) dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x) (p_8(x,t) + p_{10}(x,t) + p_{11}(x,t)) dx \quad (5.12)$$

$$p_6(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) (p_2(x,t) + p_3(x,t)) dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x) p_{12}(x,t) dx \quad (5.13)$$

$$p_7(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) (p_2(x,t) + p_4(x,t)) dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x) p_{12}(x,t) dx \quad (5.14)$$

$$p_8(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) (p_2(x,t) + p_5(x,t)) dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x) p_{12}(x,t) dx \quad (5.15)$$

$$p_9(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) (p_3(x,t) + p_4(x,t)) dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x) p_{12}(x,t) dx \quad (5.16)$$

$$p_{10}(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) (p_3(x,t) + p_5(x,t)) dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x) p_{12}(x,t) dx \quad (5.17)$$

$$p_{11}(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)(p_4(x,t) + p_5(x,t))dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x) p_{12}(x,t) dx \quad (5.18)$$

$$p_{12}(0,t) = \sum_{r=6}^{r=11} 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) p_r(x,t) dx \quad (5.19)$$

De acordo com a equação (3.39), utilizam-se os seguintes fatores integrantes:

$$\Psi_1(x) = \exp\left(-4 \int_{t=0}^{t=x} \lambda(t) dt\right) \quad (5.20)$$

$$\Psi_2(x) = \exp\left(-\int_{t=0}^{t=x} (3\lambda(t) + \mu_1(t)) dt\right) \quad (5.21)$$

$$\Psi_3(x) = \exp\left(-\int_{t=0}^{t=x} (2\lambda(t) + 2\mu_2(t)) dt\right) \quad (5.22)$$

$$\Psi_4(x) = \exp\left(-12 \int_{t=0}^{t=x} \mu_3(t) dt\right) \quad (5.23)$$

Multiplicando-se os fatores integrantes (5.20), (5.21), (5.22) e (5.23) pelas equações (5.2), (5.3), (5.4) e (5.5), obtém-se:

$$\frac{\partial p_r^*(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial p_r^*(x,t)}{\partial t} = 0 \quad r = 1, \dots, 12 \quad (5.24)$$

E, nas condições de contorno (5.8) até (5.19), obtém-se:

$$p_1^*(0,t) = \sum_{r=2}^5 \int_{x=0}^{x=\infty} \Psi_2(x) \mu_1(x) p_r^*(x,t) dx \quad (5.25)$$

$$p_2^*(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) \Psi_1(x) p_1^*(x,t) dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x) \Psi_3(x) (p_6^*(x,t) + p_7^*(x,t) + p_8^*(x,t)) dx \quad (5.26)$$

$$p_3^*(0,t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x) \Psi_1(x) p_1^*(x,t) dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x) \Psi_3(x) (p_6^*(x,t) + p_9^*(x,t) + p_{10}^*(x,t)) dx \quad (5.27)$$



$$p_4^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_1(x)p_1^{**}(x, t)dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x)\Psi_3(x)(p_7^*(x, t) + p_9^*(x, t) + p_{11}^*(x, t))dx \quad (5.28)$$

$$p_5^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_1(x)p_1^{**}(x, t)dx + \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_2(x)\Psi_3(x)(p_8^*(x, t) + p_{10}^*(x, t) + p_{11}^*(x, t))dx \quad (5.29)$$

$$p_6^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_2(x)(p_2^*(x, t) + p_3^*(x, t))dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x)\Psi_4(x)p_{12}^*(x, t)dx \quad (5.30)$$

$$p_7^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_2(x)(p_2^*(x, t) + p_4^*(x, t))dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x)\Psi_4(x)p_{12}^*(x, t)dx \quad (5.31)$$

$$p_8^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_2(x)(p_2^*(x, t) + p_5^*(x, t))dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x)\Psi_4(x)p_{12}^*(x, t)dx \quad (5.32)$$

$$p_9^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_2(x)(p_3^*(x, t) + p_4^*(x, t))dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x)\Psi_4(x)p_{12}^*(x, t)dx \quad (5.33)$$

$$p_{10}^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_2(x)(p_3^*(x, t) + p_5^*(x, t))dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x)\Psi_4(x)p_{12}^*(x, t)dx \quad (5.34)$$

$$p_{11}^*(0, t) = \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_2(x)(p_3^*(x, t) + p_5^*(x, t))dx + 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \mu_3(x)\Psi_4(x)p_{12}^*(x, t)dx \quad (5.35)$$

$$p_{12}^*(0, t) = \sum_{r=6}^{r=11} 2 \int_{x=0}^{x=\infty} \lambda(x)\Psi_3(x)p_r^*(x, t)dx \quad (5.36)$$

Analogamente, para as outras equações:

$$p_1^*(x, 0) = 4\lambda(x) \quad (5.37)$$

$$p_r^*(x, 0) = 0, r = 2 \dots 12 \quad (5.38)$$

Aplicando-se as discretizações mostradas nas equações (3.59) a (3.61) obtém-se um sistema de acordo com o apresentado pela equação (3.69), e, utilizando-se a notação de  $p(x,t) = p^*(x,t)$ , obtém-se:

$$Tp_{n+1}^{1,j+1} = p^{1,j} + \sum_{s=2}^5 Q_{s1} p_n^{s,j+1} \quad (5.39)$$

$$Tp_{n+1}^{2,j+1} = p^{2,j} + \sum_{s=6}^8 Q_{s2} p_n^{s,j+1} + Q_{12} p_n^{1,j+1} \quad (5.40)$$

Analogamente para  $r = 3, \dots, 5$ , a discretização assume a forma acima. Fazendo para  $r = 6$ , obtém-se:

$$Tp_{n+1}^{6,j+1} = p^{6,j} + Q_{26} p_n^{2,j+1} + Q_{36} p_n^{3,j+1} + Q_{126} p_n^{12,j+1} \quad (5.41)$$

Analogamente para  $r = 6, \dots, 11$ , a discretização assume a forma acima. Fazendo para  $r = 12$ , obtém-se:

$$Tp_{n+1}^{12,j+1} = p^{12,j} + \sum_{s=6}^{11} Q_{s12} p_n^{s,j+1} \quad (5.42)$$

onde:

$$p_n^{s,j} = \begin{pmatrix} p_n^{s,1,j} \\ p_n^{s,2,j} \\ \cdot \\ \cdot \\ p_n^{s,I,j} \end{pmatrix} \quad (5.43)$$

As matrizes  $Q_{rs}$  são do tipo das equações (3.67) e T é dada pela equação (3.65).

Observa-se o desacoplamento entre as equações, ou seja, para calcular-se, por exemplo,  $p_{n+1}^{12,j+1}$ , necessita-se apenas de  $p_n^{s,j+1}$ ,  $s = 6...11$ .

O algoritmo de Euler Iterativo + Característica para o problema é dado por:

1) Atribui-se um valor inicial para  $p_0^{s,j}$ , de tal forma que para:

$$1.1) p_0^{1,j,0} = 4\lambda_i, p_0^{s,i,j} = 4\lambda_{i-j}, i > j$$

$$1.2) p_0^{1,i,0} = 0, p_0^{s,i,j} = 0, i > j, s = 2, \dots, 12$$

2) Para  $j = 1, \dots, J-1$

2.1) Faça enquanto convergir

2.2) Calcule  $p_n^{s,0,j+1}$  pela discretização dada pela equação (3.61) aplicada nas equações (5.25) a (5.36).

2.3) Para  $s = 1, 12$ , Calcule  $p_{n+1}^{s,j+1}$  pelas equações (5.39) a (5.42), utilizando o algoritmo de Thomas.

2.4) Se  $\sum_{s=1}^{12} \|p_{n+1}^{s,j+1} - p_n^{s,j+1}\| < erro$ , então próximo  $j$ .

2.5) Senão, próximo  $n$  e volte para 2.2.

2.6) Multiplique  $p^{s,j+1}$  pelo fator integrante adequado dado pelas equações (5.20) a (5.23).

### 5.3. Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a o diagrama de transição de estados, a modelagem do reparo perfeito utilizando-se o método das variáveis suplementares, a discretização do sistema e o algoritmo para o sistema.

# Capítulo 6

## – Resultados –

### 6.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante as simulações numéricas realizadas para os geradores diesel de emergência da Central Nuclear de Angra 2, de acordo com o que foi proposto no Capítulo 1 e com o que foi considerado no Capítulo 5.

Para a realização dessas simulações, utilizou-se a linguagem de programação FORTRAN 90, onde cada simulação teve a duração média de processamento de aproximadamente 10 minutos em computador PENTIUM 4 – 3.4D, com HD de 250 GB e 4 GB de memória RAM.

Conforme o objetivo deste trabalho, é feita uma análise da confiabilidade dos geradores diesel de emergência da C. N. de Angra 2, considerando-se as hipóteses de envelhecimento e de reparo perfeito, pela utilização do Método das Variáveis Suplementares. Como esses equipamentos ainda estão em seu período de vida útil e a hipótese de envelhecimento é apenas uma consideração para chegar-se ao objetivo principal deste estudo, que é a simulação do envelhecimento desses geradores para o cálculo das probabilidades de falha de acordo com as idades, a estimação de uma taxa de falha (sob o ponto de vista do envelhecimento), que pudesse dar suporte ao modelo desenvolvido, tornou-se desnecessária devido a não evidência de tendências de envelhecimento para os geradores diesel de Angra 2, sendo então adotados como dados de entrada para o parâmetro taxa de falha desses geradores, os mesmos adotados por CROSSETTI (2006) para os geradores de Angra 1, os quais já estão em fase de envelhecimento. Os geradores diesel de emergência da C. N. de Angra 1 em operação, são do mesmo fabricante que os geradores da C. N. de Angra 2, existindo uma semelhança entre os GD's 3 e 4 de Angra 1 com os geradores 1 – 4 XK/XJ de Angra 2.

Vale ressaltar que não foi dado crédito às diferenças entre as falhas reais dos geradores diesel de Angra 1 e dos geradores diesel de Angra 2 (os geradores grandes, por exemplo), pelo fato de tratar-se de uma simulação.

Sendo assim, de acordo com o estudo realizado por CROSSETTI (2006), os tempos de falha para os geradores diesel de Angra 1 seguem uma distribuição Weibull com os seguintes parâmetros:  $m_1 = 1,91$  (fator de forma) e  $\theta_1 = 0,141$  ano (fator de escala), os quais, no presente estudo, serão utilizados como dados de entrada para os geradores diesel do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 1, e,  $m_2 = 1,65$  (fator de forma) e  $\theta_2 = 0,1$  ano (fator de escala), os quais serão utilizados como dados de entrada para os geradores diesel do Sistema de Suprimento Elétrico de Emergência 2.

Uma outra questão importante e que deve ser esclarecida, é que, para as taxas de reparo, foram utilizados como dados de entrada para a maioria das simulações, os tempos de reparo estabelecidos pelas Especificações Técnicas (FSAR, 2005) para os casos em que ocorram as seguintes falhas:

- Falha de um gerador: prazo de 14 dias para recuperar o gerador falho (o que equivale a uma taxa de reparo de aproximadamente 25,7 / ano);

- Falha de dois geradores: prazo de 24 horas para recuperar pelo menos um dos dois geradores falhos (o que equivale a uma taxa de reparo de aproximadamente 360 / ano), e;

- Falha de três ou mais geradores: pelo menos dois geradores devem ser imediatamente recuperados. De acordo com a experiência operacional, assume-se que o prazo “imediatamente” seja de 12 horas (o que equivale a uma taxa de reparo de aproximadamente 720 / ano), conforme descrito na Tabela 5.1.

Na prática, é razoável afirmar que os valores das taxas de reparo e os dados de manutenções preventivas sejam outros, baseados no histórico operacional desses equipamentos. Para as simulações, foram utilizados os tempos da Tabela 5.1, os quais foram extraídos das Especificações Técnicas como os principais parâmetros de entrada para taxas de reparo, e, de posse de taxas de reparo operacionais reais, esses dados podem ser utilizados como dados de entrada para novas simulações, ajustadas à realidade operacional da planta.

As simulações tiveram os seguintes objetivos:

- Calcular as probabilidades de falhas, bem como as disponibilidades dos geradores de acordo com as idades a eles atribuídas.

- Avaliar a influência da taxa de reparo na probabilidade de falha dos geradores, inclusive pela atribuição de taxas de reparo descontínuas. Entende-se por taxas de reparo descontínuas, no presente estudo, como sendo a interrupção da ação de reparo em determinado período considerado, ou como sendo a suspensão total da ação de

reparo após um período qualquer de reparo contínuo dentro do período total considerado.

A seqüência de simulações foi dividida em 7 etapas onde foram consideradas situações distintas:

a) O objetivo da primeira simulação foi definir as probabilidades de falha e as disponibilidades para os oito geradores diesel dos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2, considerando-se as idades de 40 e 60 anos para o cálculo das probabilidades de falha, e, várias idades foram atribuídas para o cálculo das disponibilidades. Para essa e também para a segunda simulação, considerou-se, arbitrariamente, que esses equipamentos entraram em operação durante um dia por ano, com as taxas de reparo estabelecidas pelas Especificações Técnicas:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ;  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ .

b) A segunda simulação incluiu taxas de reparo descontínuas nos cálculos das probabilidades de falha e das disponibilidades dos geradores diesel. Para isso, considera-se que as taxas de reparo são as mesmas utilizadas na primeira simulação para um tempo menor ou igual ao tempo de operação, e, zero para quaisquer outros valores, ou seja, enquanto os geradores estiverem operando, eles têm uma taxa de reparo de acordo com as Especificações Técnicas, porém, quando estão fora de operação, esta taxa de reparo é nula.

c) A terceira simulação possui basicamente a mesma filosofia da segunda, exceto que os tempos de operação observados foram considerados como sendo a metade da idade de operação, ou seja, considera-se que os geradores para uma idade de 60 anos, por exemplo, operem continuamente por 30 anos com uma taxa de reparo qualquer considerada, e, que durante os 30 anos seguintes, fiquem completamente sem reparo. O objetivo desta simulação é puramente teórico, para comprovação de casos extremos.

d) A quarta simulação considera que até a metade da idade atribuída aos geradores, a taxa de reparo seja:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ;  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ , e, durante a outra metade, seja fixa em:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$  para todos os possíveis estados de falha.

e) A quinta simulação considera que até a metade da idade atribuída aos geradores, a taxa de reparo seja fixa em:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$  para todos os possíveis estados de falha, e, para a outra metade, a taxa de reparo seja:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ;  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ .

f) A sexta simulação é basicamente a mesma que a quinta, diferindo apenas na taxa de reparo para a primeira metade do tempo de operação, cujo valor é  $\mu = 50$  / ano, e, para a outra metade:  $\mu_1 = 25,7$  / ano;  $\mu_2 = 360$  / ano e  $\mu_3 = 720$  / ano.

g) A sétima simulação é basicamente igual à sexta, sendo que para a primeira metade do tempo de operação, a taxa de reparo é de  $\mu = 100$  / ano, e, para a outra metade,  $\mu_1 = 25,7$  / ano;  $\mu_2 = 360$  / ano e  $\mu_3 = 720$  / ano.

De acordo com o mencionado no Capítulo 5, para este estudo, considera-se como falha, o estado 12 (ou 24), e, conforme apresentado no Capítulo 3, a probabilidade do sistema estar em um determinado estado é dada pela equação (3.1). Então, a probabilidade do sistema estar no estado falho (estado 12, por exemplo), é definida pela seguinte equação:

$$P_{12}(t) = \int_{x=0}^{x=\infty} p_{12}(x,t) dx \quad (6.1)$$

As integrais das condições de contorno, das probabilidades, bem como das disponibilidades, foram calculadas através do método numérico 1/3 de Simpson Repetido (ANDERSON et al., 1984), um método com erro de 5ª ordem e de fácil implementação.

## 6.2. Primeira Simulação

Nesta primeira simulação, foram utilizados os seguintes dados para as taxas de reparo:

- ⇒  $\mu_1 = 25,7$  / ano;
- ⇒  $\mu_2 = 360$  / ano e;
- ⇒  $\mu_3 = 720$  / ano.

Esses valores foram estipulados com base nas Especificações Técnicas, que estabelecem (como pode ser visto na Tabela 5.1) que, ocorrendo a falha de um dos geradores, o prazo para que a operabilidade do equipamento que falhou seja recuperada é de 14 dias, o que equivale a aproximadamente 25,7 / ano. Essas taxas de manutenção

foram utilizadas no cálculo das transições do estado 1 para os estados 2, 3, 4 e 5 da Figura 5.1, os quais representam a falha de um único gerador.

Para o caso em que, já havendo falhado um dos geradores (estados 2, 3, 4 e 5), um segundo gerador também falhe (estados 6, 7, 8, 9, 10 e 11), de acordo com as Especificações Técnicas, o prazo para a recuperação de pelo menos um desses geradores falhos é de 24 horas.

Para o pior caso, que seria a falha de um terceiro gerador, representado no diagrama de transição de estados da Figura 5.1 pelo estado 12 (ou 24), a usina já não poderia controlar um possível acidente, pois nessa situação ela não pode contar com pelo menos dois trens de refrigeração (2 x 50%) que é o mínimo requerido para a mitigação de um acidente. Para esta situação de falha de mais de dois geradores (falha de três ou quatro), as Especificações Técnicas exigem que ações sejam tomadas imediatamente, para que pelo menos dois geradores estejam novamente em funcionamento, ou seja, volte para qualquer um dos estados 6, 7, 8, 9, 10 e 11, dependendo de que geradores tenham falhado.

A Figura 6.2(a) representa o gráfico da probabilidade de falhas dos geradores diesel de emergência do SSEE 1, considerando-se uma idade de 40 anos para esses equipamentos, e, que eles tenham operado por apenas um dia a cada ano, resultando em um total de 40 dias de operação durante esses 40 anos.

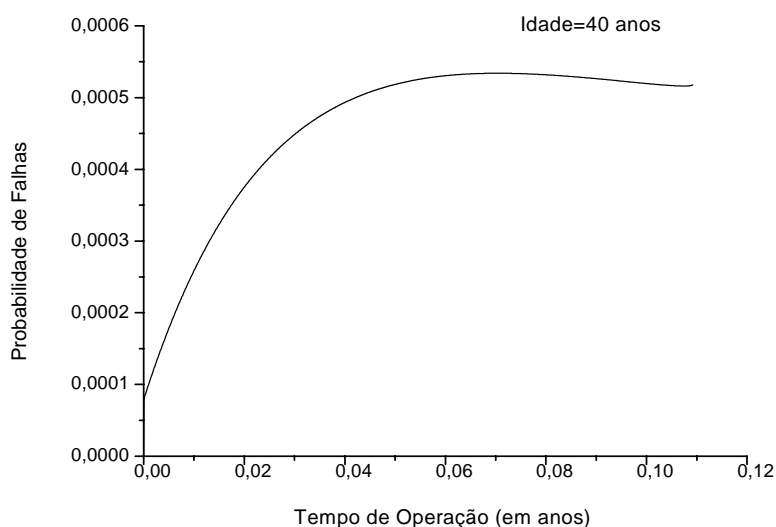


Figura 6.2(a). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (40 anos).



A Figura 6.2(b) representa o gráfico da probabilidade de falhas dos geradores diesel de emergência do SSEE 2, considerando-se uma idade de 40 anos para esses equipamentos, e, que eles tenham operado por apenas um dia a cada ano, resultando em um total de 40 dias de operação durante esses 40 anos.

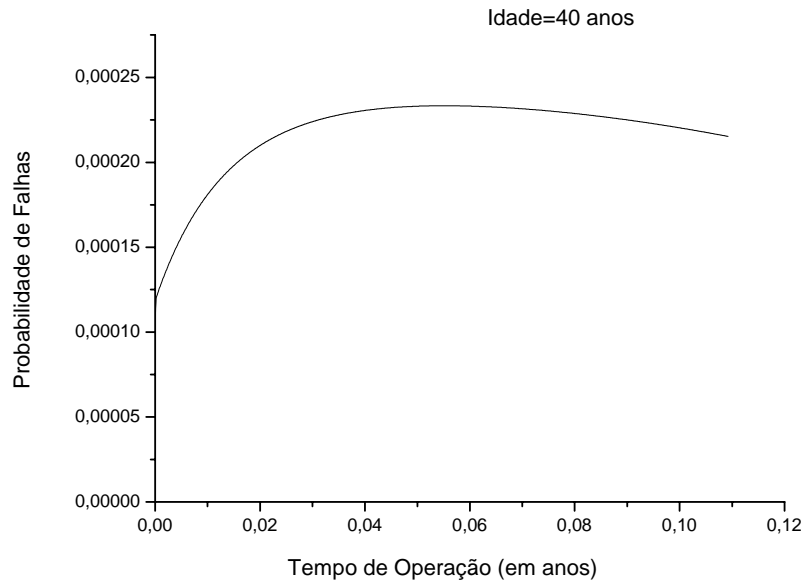


Figura 6.2(b). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (40 anos).

A Figura 6.2(c) representa o gráfico da probabilidade de falhas dos geradores diesel de emergência do SSEE 1, considerando-se uma idade de 60 anos, e que eles tenham operado por apenas um dia a cada ano, resultando em um total de 60 dias de operação durante esses 60 anos.

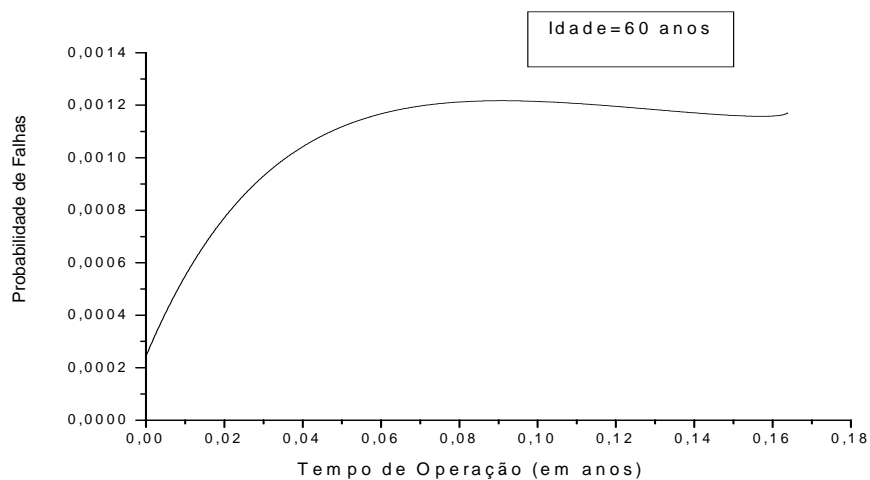


Figura 6.2(c). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

A Figura 6.2(d) representa o gráfico da probabilidade de falhas dos geradores diesel de emergência do SSEE 2, considerando-se uma idade de 60 anos, e, que eles tenham operado por apenas um dia a cada ano, resultando em um total de 60 dias de operação durante esses 60 anos.

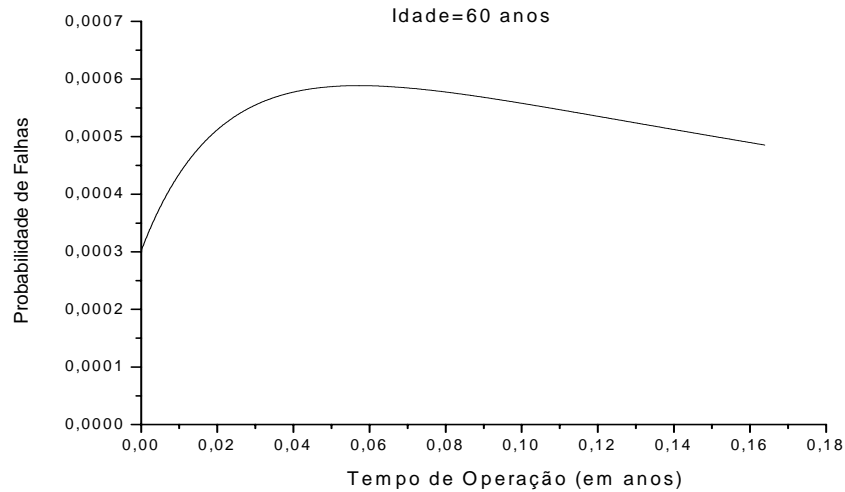


Figura 6.2(d). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

Analisando-se os gráficos das Figuras 6.2(a), 6.2(b), 6.2(c) e 6.2(d), pode-se observar a típica curva que representa a solução das equações de McKendrick (CASTILLO-CHAVEZ e BRAUER, 2001), conforme pode ser visto na Figura 6.2(e).

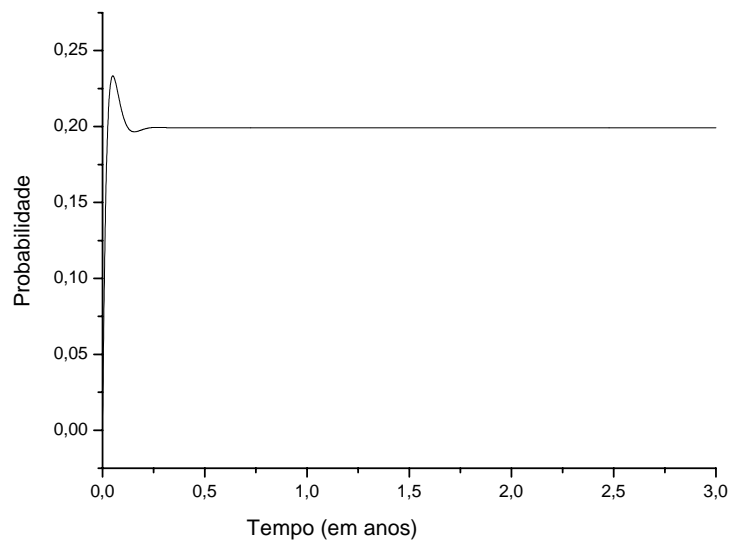


Figura 6.2(e). Curva Típica das Soluções das Equações de McKendrick.

Observa-se também que as probabilidades de falha para os geradores do SSEE 1 são maiores do que as probabilidades de falha para os geradores do SSEE 2, o que era de se esperar, pois, a taxa de falha considerada para esses geradores é maior do que a que foi considerada para os geradores do SSEE 2.

As Figuras 6.2(f) e 6.2(g) representam os gráficos da disponibilidade média dos geradores do SSEE 1 e SSEE 2, respectivamente. Várias idades foram consideradas, e, da mesma forma que para os casos anteriores, considerou-se que esses equipamentos operam por apenas um dia a cada ano considerado.

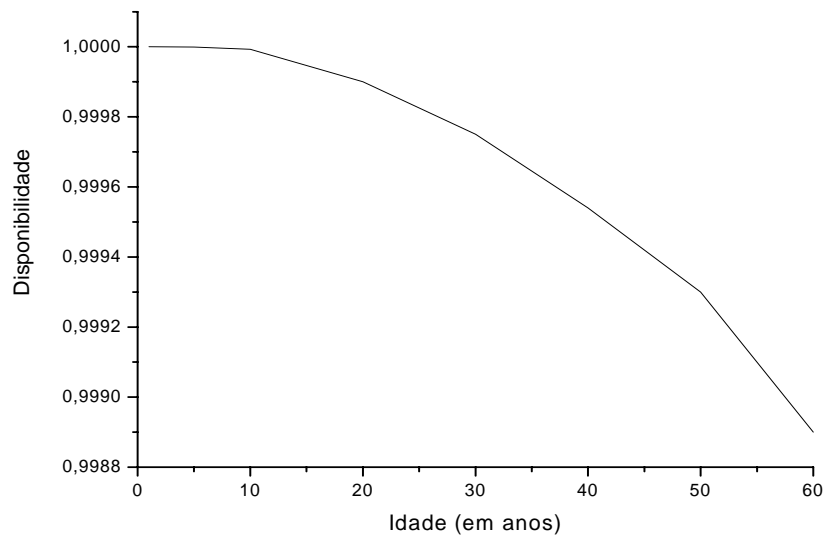


Figura 6.2(f). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1.

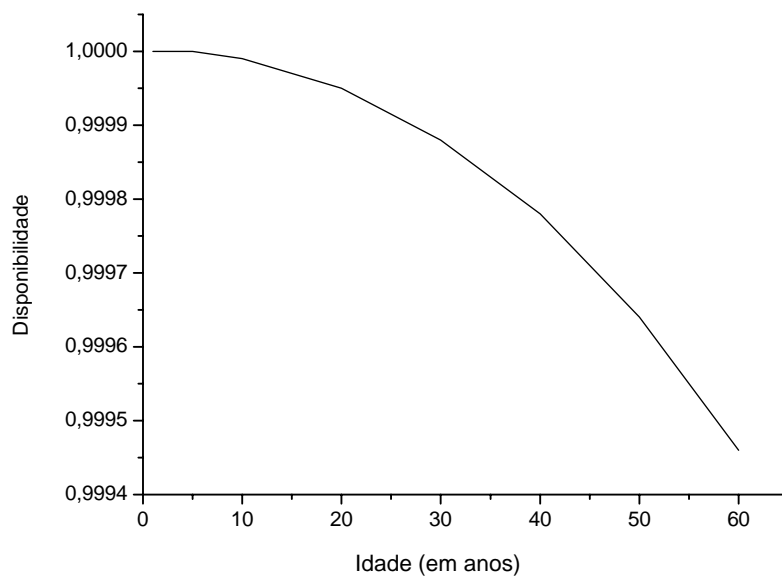


Figura 6.2(g). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2.

A disponibilidade média, não só para esta simulação, como para todas as outras, foi calculada utilizando-se a fórmula dada pela equação (2.6), bem como a discretização dada pela equação (3.61), e, como método de integração utilizou-se o 1/3 de Simpson Repetido.

Da mesma forma como foi observado nos gráficos das probabilidades de falha dos geradores do SSEE 1 e dos geradores do SSEE 2, percebe-se para os gráficos das disponibilidades desses mesmos geradores, uma disponibilidade média maior para os geradores do SSEE 2, como era de se esperar, já que a taxa de falha considerada para os geradores do SSEE 1 é maior.

### 6.3. Segunda Simulação

Nesta segunda simulação, foram utilizados os seguintes dados para as taxas de reparo:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 25,7 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo de operação} = (1 \text{ dia} / \text{ano}).\text{idade} \\ 0 / \text{ano} & , x > \text{tempo de operação} = (1 \text{ dia} / \text{ano}).\text{idade} \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 360 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo de operação} = (1 \text{ dia} / \text{ano}).\text{idade} \\ 0 / \text{ano} & , x > \text{tempo de operação} = (1 \text{ dia} / \text{ano}).\text{idade} \end{cases}$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 720 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo de operação} = (1 \text{ dia} / \text{ano}).\text{idade} \\ 0 / \text{ano} & , x > \text{tempo de operação} = (1 \text{ dia} / \text{ano}).\text{idade} \end{cases}$$

Esta segunda simulação inclui taxas de reparo descontínuas no cálculo das probabilidades de falha e das disponibilidades dos geradores diesel. Para isso, considerou-se que as taxas de reparo são as mesmas utilizadas na primeira simulação ( $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ,  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ ) para um tempo de operação menor ou igual ao tempo total (idade) considerado, e, zero (ou seja, nenhum reparo) para outros valores, de modo que, enquanto os geradores estiverem operando, eles têm a taxa de reparo considerada acima, porém, quando estiverem fora de operação, esta taxa de reparo é nula. Vale ressaltar que quando se diz que os geradores, neste caso, estão fora

de operação, quer-se dizer que eles estão apenas sob os efeitos do envelhecimento e fora de funcionamento.

As Figuras 6.3(a) e 6.3(b) representam os gráficos das probabilidades de falha para os geradores diesel do SSEE 1 e SSEE 2, respectivamente, para uma idade de 40 anos.

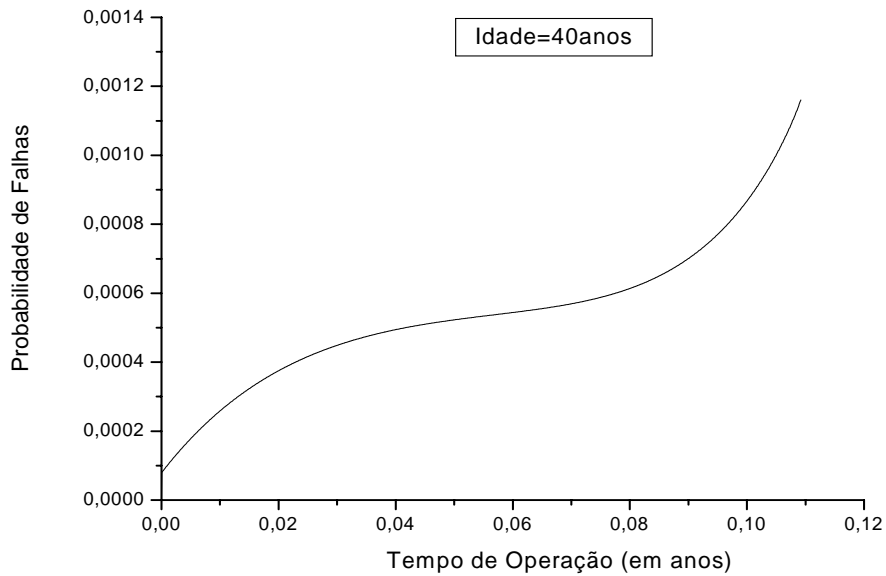


Figura 6.3(a). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (40 anos).

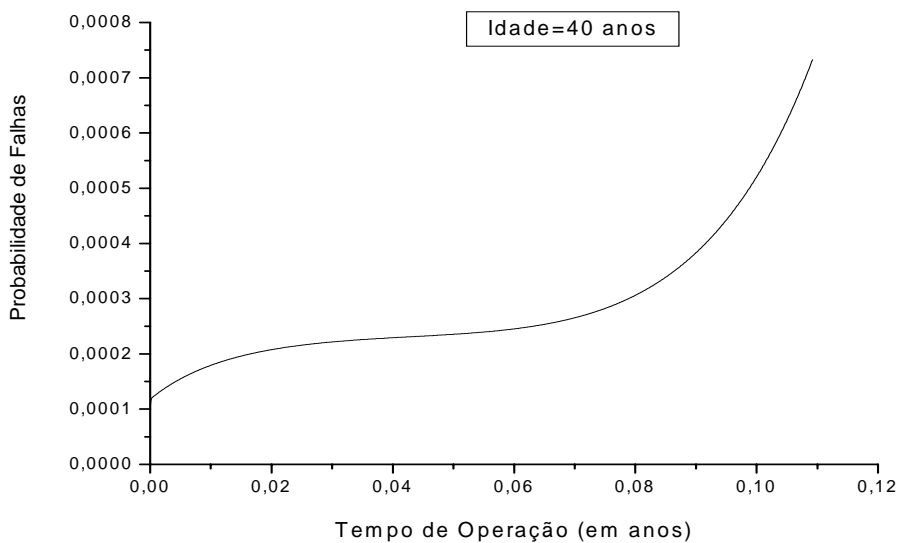


Figura 6.3(b). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (40 anos).

As Figuras 6.3(c) e 6.3(d) representam os gráficos das probabilidades de falha para os geradores diesel do SSEE 1 e SSEE 2, respectivamente, para uma idade de 60 anos.

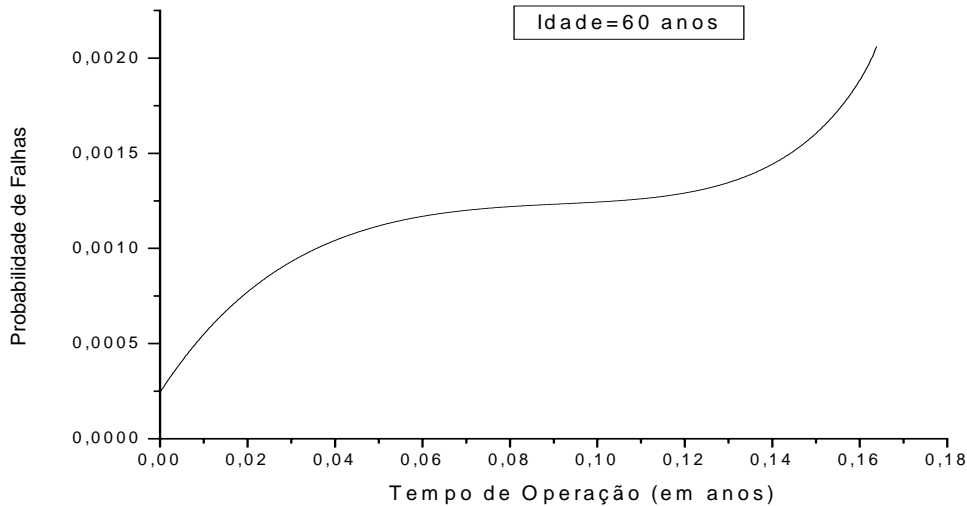


Figura 6.3(c). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

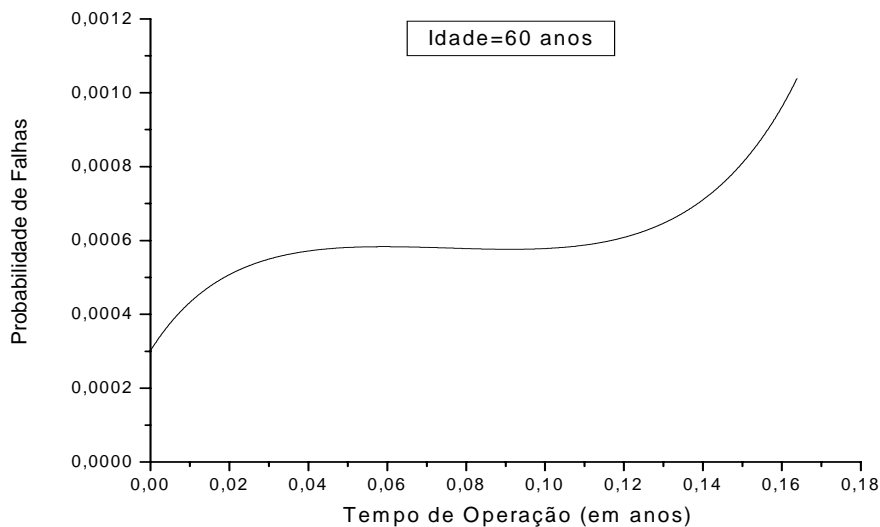


Figura 6.3(d). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

Do ponto de vista dos resultados matemáticos, o efeito da descontinuidade das taxas de reparo aparece nas formas das curvas como pode ser observado nos gráficos 6.3(a), 6.3(b), 6.3(c) e 6.3(d). Existem dois pontos de inflexão nas curvas: um em torno de 0,04 anos e outro em torno de 0,10 anos. O ponto de 0,04 anos é o ponto de máximo que apareceu na primeira simulação e o ponto de 0,10 anos é um ponto onde ocorre o

aumento das probabilidades de falha, que pode ser explicado pela proximidade do ponto de descontinuidade da taxa de reparo, como explica THOMAS (1999). As descontinuidades para esse tipo de equação propagam-se ao longo das curvas características de acordo com IÓRIO (1991).

Do ponto de vista da Engenharia, pode-se observar que a política de manutenção causa impacto direto no aumento ou na redução das probabilidades de falha e disponibilidades dos geradores diesel.

As Figuras 6.3(e) e 6.3(f) representam os gráficos da disponibilidade média dos geradores diesel dos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2, respectivamente. Várias idades foram atribuídas considerando-se que os geradores operam um dia por ano.

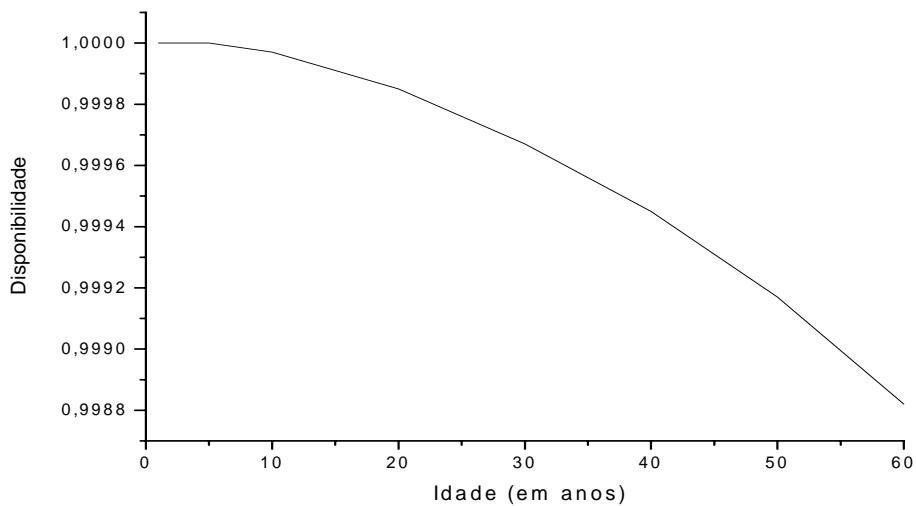


Figura 6.3(e). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1.

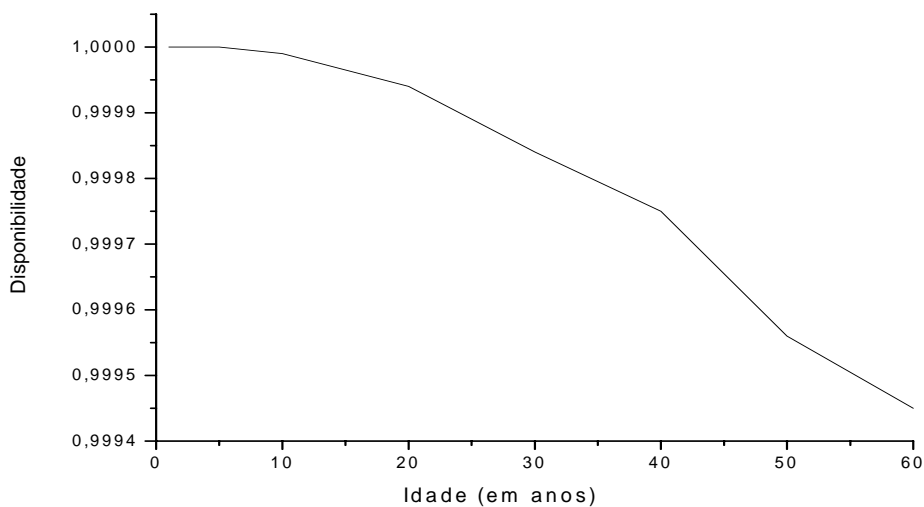


Figura 6.3(f). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2.

Os gráficos das disponibilidades representadas pelas figuras 6.3(e) e 6.3(f) não são muito diferentes dos gráficos das Figuras 6.2(f) e 6.2(g), porém, as formas do “decaimento” das disponibilidades observadas nos gráficos das Figuras 6.3(e) e 6.3(f) são mais acentuadas do que nos gráficos das Figuras 6.2(f) e 6.2(g). A queda na disponibilidade pode ser explicada pelo fato de que as ações de reparo são interrompidas quando os geradores ficam fora de operação, apenas sob os efeitos do envelhecimento.

#### 6.4. Terceira Simulação

Para essa terceira simulação, foram considerados os mesmos procedimentos da segunda simulação, porém com o diferencial do aumento no tempo de operação dos geradores. É uma situação puramente teórica, não havendo paralelo com a operação normal. Sua execução teve como objetivo a comprovação do comportamento discutido em THOMAS (1999).

As Figuras 6.4(a) e 6.4(b) representam os gráficos das probabilidades de falha para os geradores diesel dos SSEE 1 e 2, respectivamente, para uma idade de 60 anos, operando ininterruptamente por 30 anos com as mesmas taxas de reparo consideradas na primeira simulação. Considera-se que depois desses 30 anos, os geradores fiquem sem reparo e fora de operação, apenas sob os efeitos do envelhecimento.

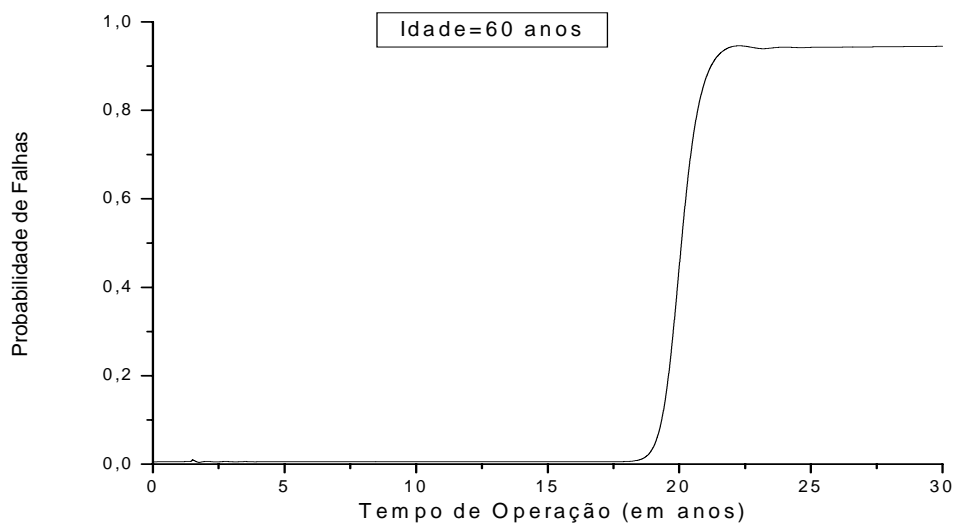


Figura 6.4(a). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).



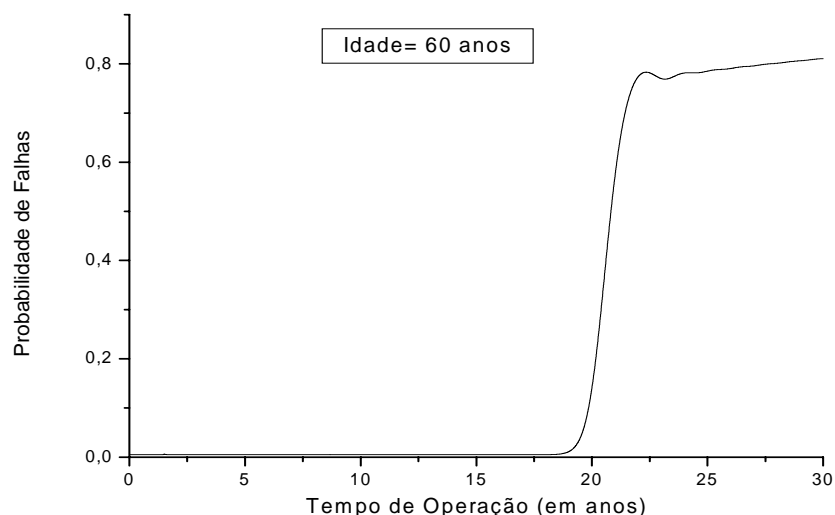


Figura 6.4(b). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

Nos gráficos das Figuras 6.4(a) e 6.4(b), observa-se o aparecimento de um ponto de inflexão próximo aos 20 anos, com uma oscilação em torno dos 25 anos. Tal comportamento de probabilidades era esperado de acordo com o descrito em THOMAS (1999), que diz que o aparecimento da oscilação deve-se ao fato da descontinuidade das taxas de reparo e ao fato do método de Euler ser um método de 2ª ordem.

As Figuras 6.4(c) e 6.4(d) representam os gráficos das disponibilidades médias para os geradores dos SSEE 1 e 2 para uma idade de 60 anos. Repara-se que quando se chega perto dos 20 anos, a disponibilidade cai expressivamente, confirmando o fato de que, o uso de um equipamento por um grande período de tempo conduz a uma baixa disponibilidade se não houver uma boa política (estratégia) de reparo.

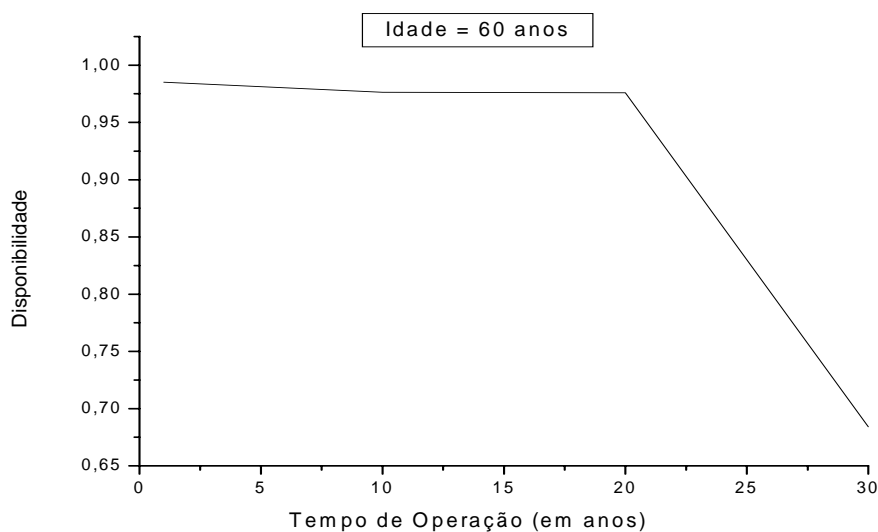


Figura 6.4(c). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

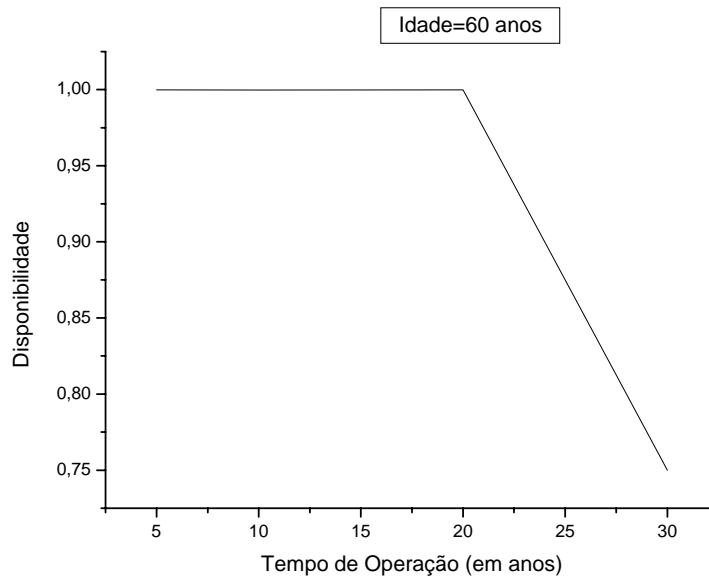


Figura 6.4(d). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

### 6.5. Quarta Simulação

Nesta quarta simulação, foram utilizados os seguintes dados para as taxas de reparo:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 25,7 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 25,7 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 360 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 25,7 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 720 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 25,7 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

Para essa quarta simulação, considera-se que até a metade da idade atribuída aos geradores diesel, as taxas de reparo são as seguintes:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ,  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ , e, que para a outra metade, a taxa de reparo é arbitrariamente fixada em  $\mu_0 = 25,7 / \text{ano}$ .

As Figuras 6.5(a) e 6.5(b) representam os gráficos das probabilidades de falha para os geradores diesel dos SSEE 1 e 2, para uma idade de 60 anos, considerando-se que até a primeira metade desses 60 anos, esses equipamentos operam com as taxas de reparo  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ,  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ , e, que para os 30 anos seguintes eles fiquem fora de operação com uma taxa de reparo (manutenção preventiva) arbitrariamente fixada em  $25,7 / \text{ano}$ .

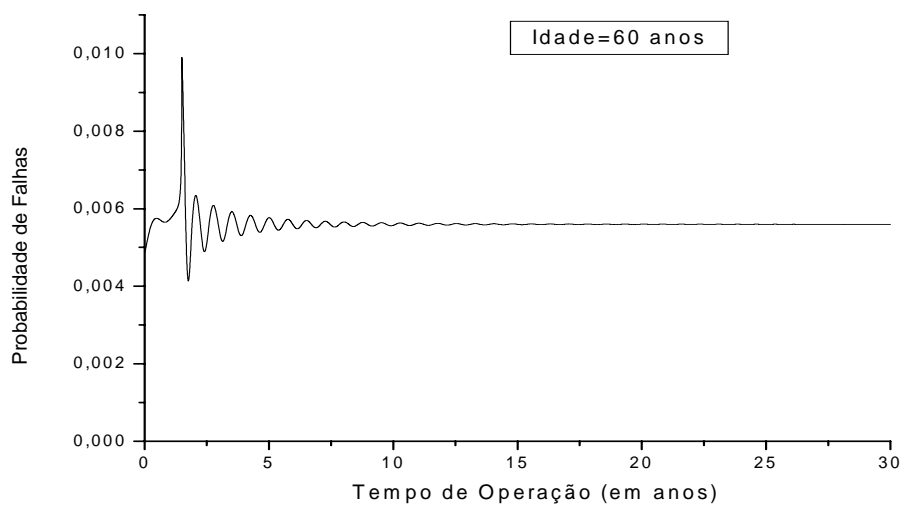


Figura 6.5(a). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

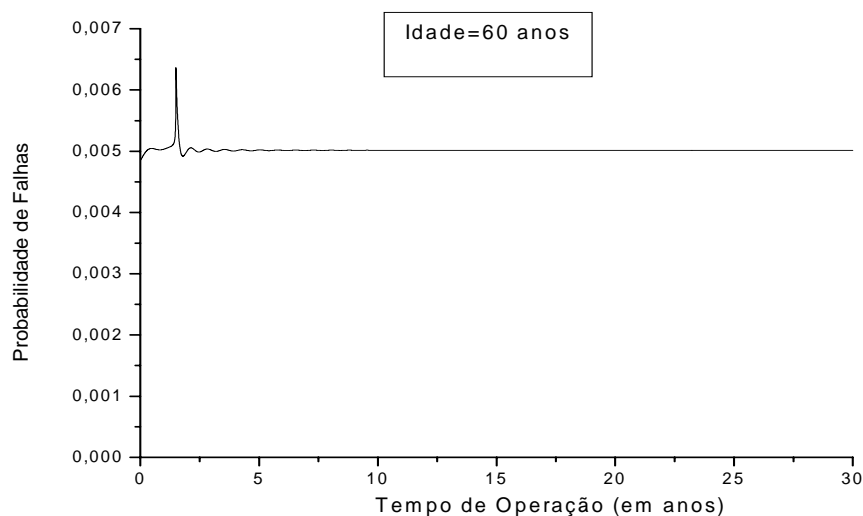


Figura 6.5(b). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

As Figuras 6.5(c) e 6.5(d) representam os gráficos das disponibilidades para os geradores diesel dos SSEE 1 e 2, para uma idade de 60 anos, variando-se o tempo de operação até os 30 anos.

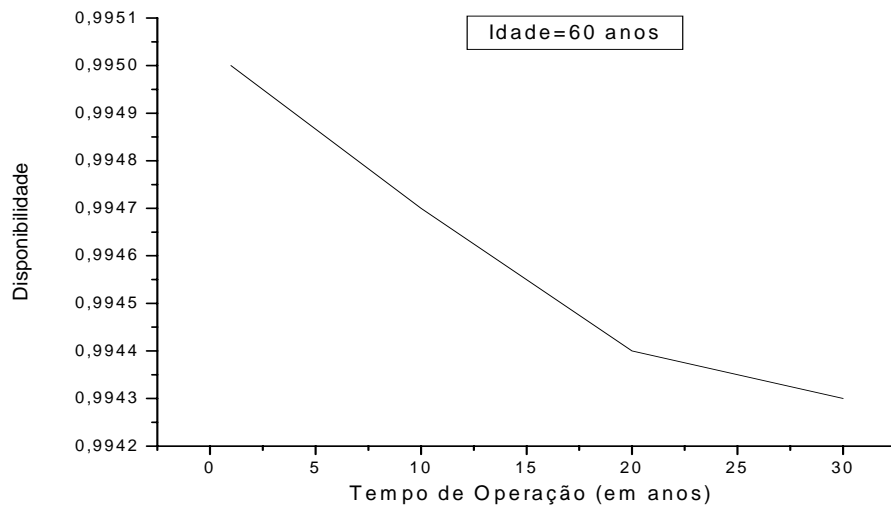


Figura 6.5(c). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

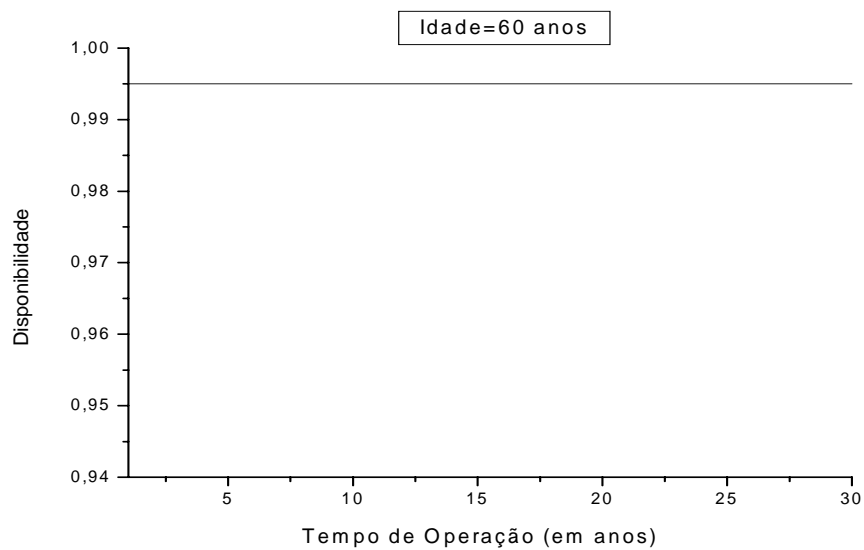


Figura 6.5(d). Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

De acordo com o observado nos gráficos das Figuras 6.5(a), 6.5(b), 6.5(c) e 6.5(d), e, comparando-se com os resultados obtidos na simulação 3, pode-se concluir que um aumento nas taxas de reparo implica em uma diminuição considerável nas probabilidades de falhas dos geradores, bem como um aumento da disponibilidade dos mesmos.

## 6.6. Quinta Simulação

Nesta quinta simulação, foram utilizados os seguintes dados para as taxas de reparo:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 25,7 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 25,7 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 25,7 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 360 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 25,7 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 720 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

Para essa quinta simulação, considera-se que até a metade da idade atribuída aos geradores diesel, a taxa de reparo é arbitrariamente fixada em  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ , e, que para a outra metade as taxas de reparo sejam:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ,  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ , ou seja, considera-se uma simetria em relação à quarta simulação.

As Figuras 6.6(a) e 6.6(b) representam os gráficos das probabilidades de falha para os geradores diesel dos SSEE 1 e 2, para uma idade de 60 anos, considerando-se que até os 30 anos esses equipamentos operem com uma taxa de reparo igual a  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ , e, que para os outros 30 anos eles fiquem fora de operação e sob os efeitos do envelhecimento, porém com taxas de reparo iguais a:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ,  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$  (manutenção preventiva).

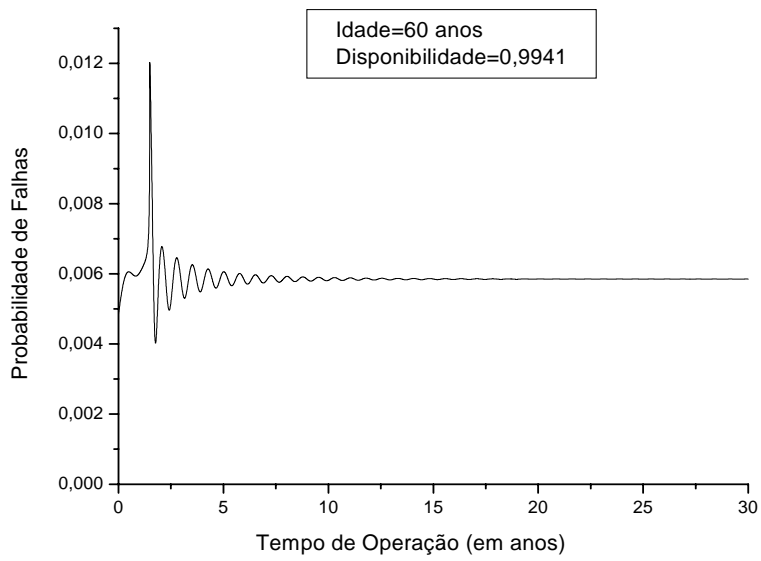


Figura 6.6(a). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

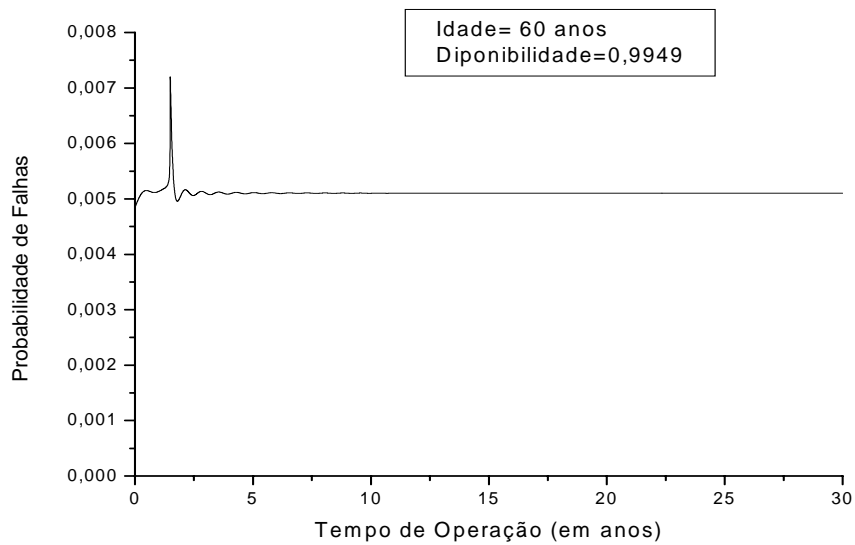


Figura 6.6(b). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

Nessa simulação pode-se observar que os resultados são bem parecidos com os apresentados para a quarta simulação em função da inversão na ordem da aplicação das taxas de reparo.

## 6.7. Sexta Simulação

Nesta sexta simulação, foram utilizados os seguintes dados para as taxas de reparo (manutenção):

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 50 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 25,7 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 50 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 360 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 50 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 720 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

Para essa sexta simulação são feitas as mesmas considerações da quinta simulação, exceto que até a metade da idade atribuída aos geradores diesel, a taxa de reparo é arbitrariamente fixada em  $\mu_1 = 50 / \text{ano}$ , e, que para a outra metade as taxas de reparo sejam:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ,  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ .

As Figuras 6.7(a) e 6.7(b) representam os gráficos das probabilidades de falha para os geradores diesel dos SSEE 1 e 2, para uma idade de 60 anos.

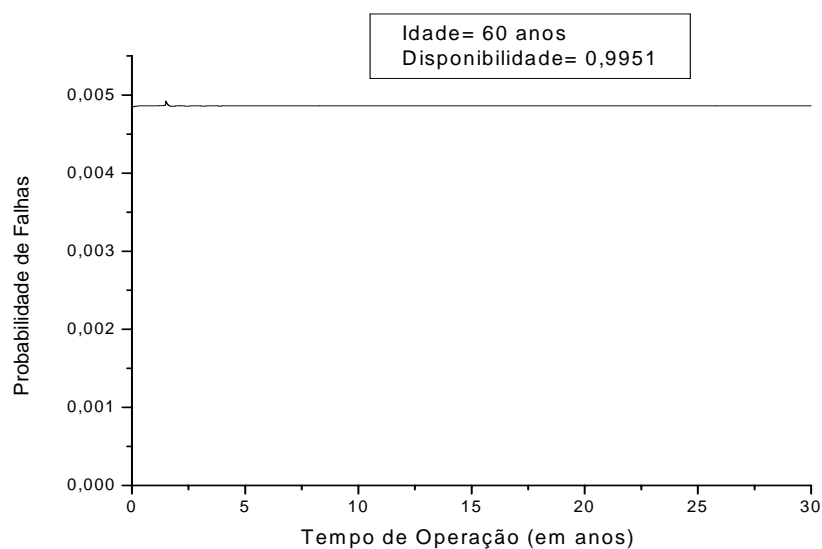


Figura 6.7(a). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

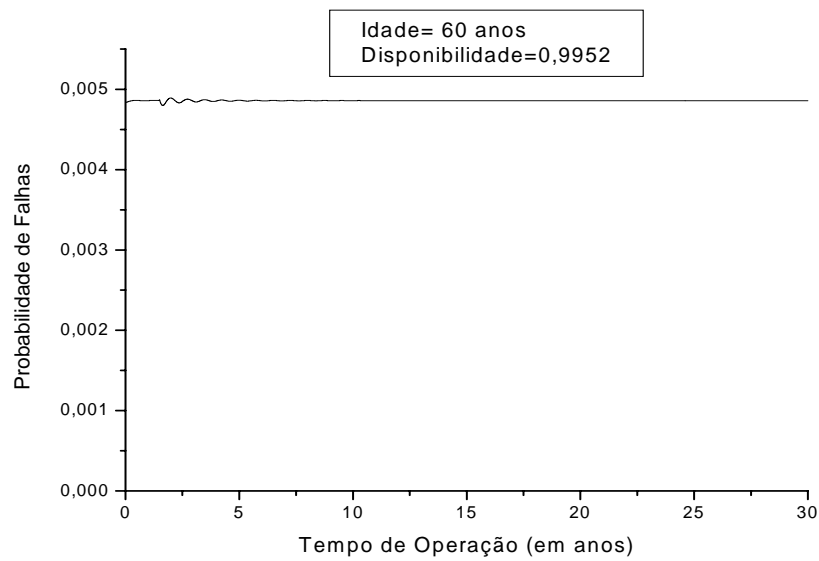


Figura 6.7(b). Probabilidade de Falhas dos Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

### 6.8. Sétima Simulação

Nesta sétima simulação, foram utilizados os seguintes dados para as taxas de reparo (manutenção):

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 100 / \text{ano} & , 0 < x \leq \text{tempo\_operação} \\ 25,7 / \text{ano} & , x > \text{tempo\_operação} \end{cases}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 100 / \text{ano} & , 0 < x \leq 30 \text{ anos} \\ 360 / \text{ano} & , x > 30 \text{ anos} \end{cases}$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 100 / \text{ano} & , 0 < x \leq 30 \text{ anos} \\ 720 / \text{ano} & , x > 30 \text{ anos} \end{cases}$$

Para essa sétima simulação são feitas as mesmas considerações da sexta simulação, exceto que até a metade da idade atribuída aos geradores diesel, a taxa de reparo é arbitrariamente fixada em:  $\mu_1 = 100 / \text{ano}$ , e, que para a outra metade as taxas



de reparo sejam:  $\mu_1 = 25,7 / \text{ano}$ ,  $\mu_2 = 360 / \text{ano}$  e  $\mu_3 = 720 / \text{ano}$ , dobrando-se mais uma vez o valor da taxa de reparo.

As Figuras 6.8(a) e 6.8(b) representam os gráficos das probabilidades de falha para os geradores diesel dos SSEE 1 e 2, para uma idade de 60 anos.

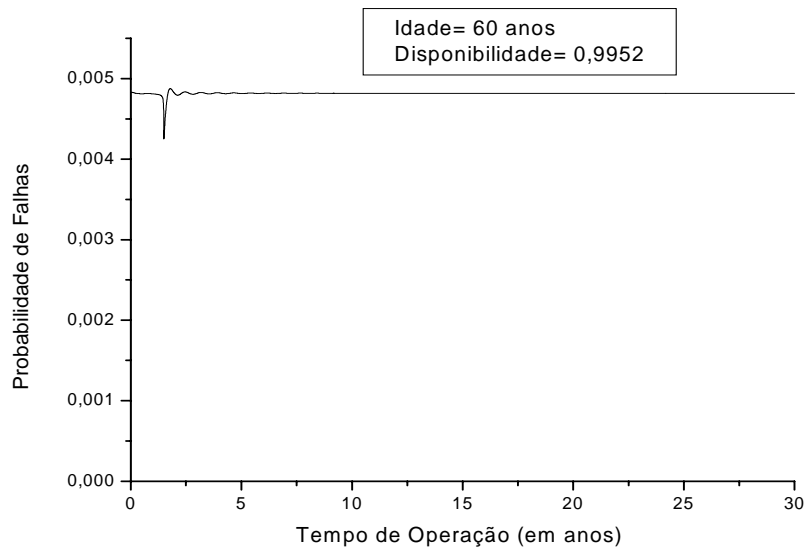


Figura 6.8(a). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 1 – (60 anos).

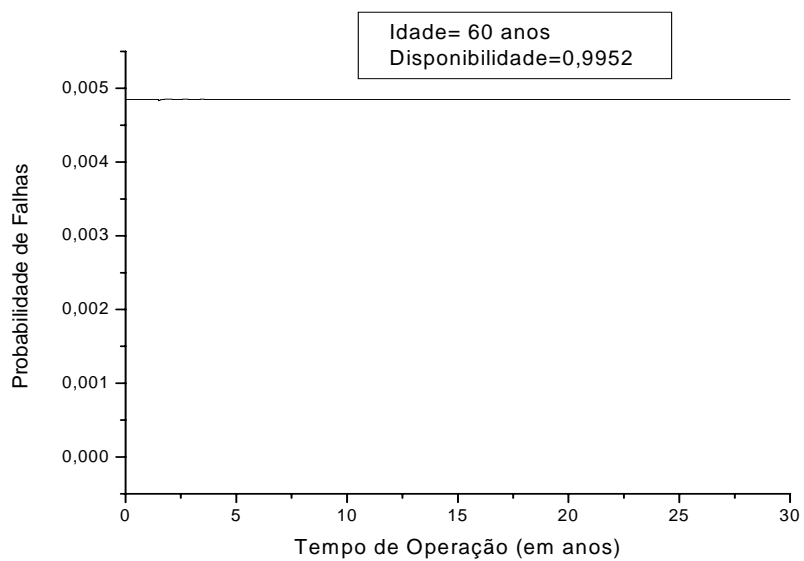


Figura 6.8(b). Probabilidade de Falhas para os Geradores Diesel do SSEE 2 – (60 anos).

## 6.9. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos através das sete simulações realizadas com a finalidade de analisar a confiabilidade dos geradores diesel de emergência da Central Nuclear de Angra 2, sob a influência de diversas políticas de manutenção, através da variação das taxas de reparo.

Destacam-se dois pontos importantes que foram observados:

- O primeiro está relacionado com os efeitos percebidos com a introdução de taxas de reparo descontínuas que resultou no aparecimento de oscilações, previstas do ponto de vista matemático, como pode ser conferido em THOMAS (1999). Essas oscilações também podem ser explicadas pelo fato de ter sido utilizado um método de 2ª ordem (Euler).

- Outro ponto importante que foi observado, é que, quando a taxa de reparo é aumentada, confirma-se através das simulações, o aumento na disponibilidade dos geradores.

A Tabela 6.1 relaciona as taxas de reparo constantes consideradas nas simulações com suas respectivas probabilidades de falha, e, a Tabela 6.2 relaciona as disponibilidades médias com as taxas de reparo constantes até os 30 anos. Ambas foram obtidas através dos resultados das simulações 5, 6 e 7.

Tabela 6.1. Taxas de Reparo Constantes x Probabilidade de Falha Estacionária.

Taxa de Reparo Constante até os 30 anos	Probabilidade de Falha Estacionária para os Geradores Diesel do SSEE 1	Probabilidade de Falha Estacionária para os Geradores Diesel do SSEE 2
25,7 / ano	0,0055	0,005
50 / ano	0,005	0,005
100 / ano	0,005	0,005

Tabela 6.2. Taxas de Reparo Constantes x Disponibilidade Média.

Taxa de Reparo Constante até os 30 anos	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 1 (30 anos)	Disponibilidade Média para os Geradores Diesel do SSEE 2 (30 anos)
25,7 / ano	0,9941	0,9949
50 / ano	0,9951	0,9952
100 / ano	0,9952	0,9952

A Tabela 6.1 mostra que para uma grande variação na taxa de reparo obtém-se uma pequena variação na probabilidade de falha estacionária. Isto indica que uma política de reparo menos rigorosa para a falha de dois ou mais geradores pode ser planejada, desde que a política de reparo para a falha de um gerador seja mais rigorosa. Se houvesse uma norma de segurança que indicasse que a probabilidade de falha pudesse ser menor que 0,006, por exemplo, uma estratégia de manutenção para os primeiros 30 anos com taxa de reparo igual a 25,7 / ano poderia ser escolhida.

A Tabela 6.2 indica uma maior variação entre as disponibilidades para as políticas de reparo entre as taxas de 25,7 e 50 / ano, porém, não houve tal variação para taxas entre 50 e 100 / ano.

Vale ressaltar que as simulações foram realizadas considerando-se tempos de operação extremos, que serviram como verificação do uso das taxas de reparo descontínuas, mas precisamente nas simulações 1, 2 e 3, bem como da idéia de simetria introduzida nas simulações 4 e 5, onde as estratégias de reparo foram invertidas, apresentando resultados qualitativamente razoáveis.

Um aumento na política de reparo leva a uma diminuição das probabilidades de falha e a um aumento da disponibilidade média. As simulações 5, 6 e 7, indicam que um planejamento menos rigoroso na política de reparo pode ser analisado.

## Capítulo 7

### – Conclusões e Recomendações –

As conclusões do presente trabalho estão baseadas nos resultados obtidos a partir das simulações realizadas no Capítulo 6, em função da metodologia aplicada à proposta inicial.

Fez-se uma analogia entre a teoria das variáveis suplementares e as equações de McKendrick, ficando evidente que a modelagem de variáveis suplementares é um balanço entre equipamentos funcionando ou em reparo, como pode ser observado em PINHO (2000).

Quando as equações (3.12), (3.13) e (3.14) são manipuladas e transformadas em (3.45), (3.46) e (3.47), verifica-se o aparecimento das equações integrais de renovação (3.49) e (2.13), mostrando claramente a filosofia do reparo perfeito, pois, conforme apresentado no Capítulo 2, a renovação é simplesmente a substituição do equipamento falho.

Também foi apresentado um novo método numérico, desenvolvido a partir do método de Euler Iterativo, o qual faz uso da discretização de Euler Implícito, fazendo iterações em função das condições de contorno (PINHO et al., 2006). Este método, chamado de Euler Iterativo + Característica, é o método de Euler Iterativo que utiliza parte da solução analítica previamente conhecida, de acordo com a equação (3.48).

Partindo-se da análise dos Capítulos 4 e 5, implementou-se um algoritmo para a modelagem que permitiu a simulação da hipótese de envelhecimento para os geradores diesel de emergência dos Sistemas de Suprimento Elétrico de Emergência 1 e 2, da Central Nuclear de Angra 2, utilizando-se as técnicas apresentadas nos capítulos anteriores.

Dos Capítulos 3 e 5, podem ser extraídas as informações necessárias ao entendimento da modelagem, bem como da utilização do método de Euler Iterativo + Característica que é apresentado neste estudo, sendo uma boa ferramenta para o desacoplamento total do sistema de equações. Com isso, pode-se pensar na possibilidade de partir-se para o campo da programação paralela como maneira de calcular-se simultaneamente as densidades  $p_1, \dots, p_{12}$ , pelo método de Euler Iterativo + Característica.

De acordo com o objetivo deste trabalho, diversas simulações foram realizadas para a análise da confiabilidade dos geradores diesel de emergência de Angra 2, tendo a primeira delas considerado um pequeno tempo de operação e taxas de reparo contínuas, arbitradas para as simulações com base no estabelecido pelas Especificações Técnicas.

A partir da segunda simulação, foram consideradas taxas de reparo descontínuas como um diferencial em relação a outros trabalhos semelhantes, ressaltando-se que taxas de reparo descontínuas violam o teorema de existência e unicidade para a solução forte (PINHO, 2000) e com isso são obtidas as chamadas soluções fracas (HOLDEN e RISEBRO, 2002).

Conforme mostrado a partir da simulação 3, em função das taxas de reparo serem descontínuas e do método de Euler Implícito ser um método de 2ª ordem, apareceram oscilações durante o cálculo das probabilidades, como também foram observadas descontinuidades nos gráficos das disponibilidades.

Do ponto de vista da Engenharia, pode-se concluir que em algumas simulações, como no caso das simulações 2 e 3, as políticas de manutenção adotadas não são praticadas, elas apenas serviram para confirmar o efeito da descontinuidade percebido nos gráficos, além de comprovar a correta utilização do método numérico, cujo comportamento dos gráficos para efeitos de descontinuidade coincide com os resultados obtidos.

Nas simulações 4 e 5, percebe-se que os resultados obtidos através da adoção de políticas de reparo com filosofias simétricas em relação à idade, não sofrem alterações significativas para as duas simulações. Do ponto de vista operacional, estes resultados indicam que, a adoção de uma política de manutenção de acordo com um critério pré-determinado até a metade da idade do equipamento, seguida da adoção de um valor constante de taxa de reparo durante a outra metade da idade e vice-versa, não causam alterações significativas nas probabilidades de falha e disponibilidades desses equipamentos.

De acordo com o ilustrado nas tabelas 6.1 e 6.2, pode-se observar que para as simulações 5, 6 e 7, apesar das distintas políticas adotadas em cada caso, não houve uma diferença significativa entre as probabilidades de falha para os geradores diesel dos SSEE 1 e SSEE 2. Porém, para as disponibilidades dos geradores diesel do SSEE 1, houve apenas uma alteração no que diz respeito à disponibilidade desses geradores para as simulações 5 e 6, mas, para as simulações 6 e 7, não foram percebidas alterações significativas e as disponibilidades permaneceram praticamente as mesmas. Na prática,

isso indica que, fora de operação, manutenções preventivas menos rigorosas podem ser adotadas.

Conforme os resultados obtidos, pode-se comprovar que, quando a taxa de reparo (manutenção) é aumentada, também ocorre um aumento na disponibilidade dos geradores, bem como uma redução no valor das probabilidades de falhas dos mesmos, confirmando a idéia de que assumindo-se estratégias de manutenção dentro de valores bem avaliados, pode-se manter a confiabilidade dos equipamentos em níveis desejados por um longo período de operação, e, conseqüentemente, aumentar seu tempo de vida útil.

Percebe-se que a modelagem utilizando-se o Método das Variáveis Suplementares trata bem o problema do envelhecimento, mas, depende de solução numérica. Para o presente estudo, o método de Euler Iterativo + Característica mostrou-se adequado qualitativamente para a obtenção dos resultados, além de acelerar a convergência da solução numérica.

No que diz respeito a trabalhos futuros, recomenda-se que seja realizada a comparação com outros métodos, como por exemplo, os métodos de Euler Iterativo e Euler Explícito (PINHO, 2000).

Como outra sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a investigação das oscilações apresentadas nos gráficos, causadas pela influência das taxas de falha e de reparo. Para isso deve ser estudada a convergência da solução numérica para a solução fraca (COCOZZA et al., 2006).

Além disso, sugere-se que sejam considerados em cada estado do diagrama de transição de estados, os oito geradores diesel dos dois sistemas de emergência (SSEE 1 e SSEE 2) simultaneamente, e não em separado como foi considerado no presente estudo. O sistema então, passaria a ter 106 estados, possibilitando o cálculo das probabilidades de falha em conjunto de trens dos dois sistemas de emergência.

## Referências Bibliográficas

- ACKLEH, A. S., & ITO, K., 1998, *An Implicit Finite Difference Scheme for the Nonlinear Size-Structured Population Model*. Numer. Funct. Anal. Optim., 8, 865-884.
- AMENDOLA, A., BUSTAMANTE, A. S., 1986, *Reliability Engineering*. Boston, Kluwer Academic Publishers.
- ANDERSON DALE A., TANNEHILL JOHN C., PLETCHER RICHARD H., 1984, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. New York, Hemisphere Publishing Corporation.
- ASCHER, H., FEINGOLD, H., 1984, *Repairable Systems Reliability, Modeling, Inference, Misconceptions and Their Causes*. New York, Marcel Dekker.
- BEICHELT, F., 2006, *Stochastic Processes in Science, Engineering and Finance*. New York, Chapman & Hall/CRC.
- BILLINTON, R., ALLAN, R.N., 1983, *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*. New York, Plenum Press.
- BRANDI, E. M., 1986, *Análise Probabilística do Sistema de Suprimento de Energia Elétrica para os Barramentos de uma Central Nuclear Típica de Quatro "Loops"*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BURTON, F., 1983, *Stochastic Processes in Science, Engineering and Finance*. New York, Chapman & Hall/CRC.
- CASTILLO-CHAVEZ, C., BRAUER, F., 2001, *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. New York, Springer.

- CFOL, 1998, *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – Suprimento Elétrico de Emergência e Perda da Fonte Fria (Black-out) - SEEM*. Divisão de Treinamento, ELETRONUCLEAR.
- COCOZZA, T. C., EYMARD, R., MERCIER, S., 2006, *A Finite-Volume Scheme for Dynamic Reliability Models*. Laboratoire d'Analyse et de Mathématiques Appliquées (CNRS UMR 8050), Université de Marne-la-Vallée, France.
- COX, D. R., 1955, “*The Analysis of Non-Markovian Stochastic Processes by the Inclusion of Supplementary Variables*”, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, n. 51, pp. 431-441.
- COX, D. R., MILLER, H. D., 1965, *The Theory of Stochastic Processes*, London, Methuen.
- CROSSETTI, P. G., 2006, *Um Modelo de Confiabilidade do Sistema Elétrico de Angra I pelo Método dos Estágios Otimizados por Algoritmos Genéticos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FSAR, 2005, *Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Unit 2*, ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A, Rev. 9, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GOLDBERG, D. E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. USA, Addison Wesley Longman.
- GUSTAFSON, K. E., 1999, *Introduction to Partial Differential Equations and Hilbert Space Methods*. New York, Dover Publication Inc.
- HOLDEN, H., RISEBRO, N. H., 2002, *Front Tracking for Hyperbolic Conservation Laws*. Applied Mathematical Sciences, Vol. 152, Springer.



- HOWISON, S., 2005, *Practical Applied Mathematics Modelling - Analysis Approximation*. Cambridge Texts in Applied Mathematics, Cambridge, Cambridge University Press.
- IÓRIO, V., 1991, *EDP, Um Curso de Introdução*. Rio de Janeiro, Coleção Matemática Universitária, IMPA.
- JAMES B. R., 1996, *Probabilidade: Um Curso em Nível Intermediário*. Rio de Janeiro, Projeto Euclides, IMPA.
- KARLIN, S., TAYLOR, H. M., 1975, *A First Course in Stochastic Process*. San Diego Academic Press.
- LEWIS, E. E., 1994, *Introduction to Reliability Engineering*. 2 ed. New York, John Wiley & Sons.
- LINS, R. P., 2003, *Cálculo da Confiabilidade de Sistemas sob Envelhecimento Através do Método dos Estágios e de Algoritmos Genéticos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MURRAY, J. D., 2002, *Mathematical Biology I: An Introduction*. New York, Springer.
- OLIVEIRA, L. F. S., FRUTUOSO E MELO, P. F. F., LIMA, J. E. P., NETTO, J. D. A., 1987, *Introdução à Análise de Segurança por Árvore de Falhas. Vol.1*, COPPE/UFRJ, Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, E. A., 2001, *Uso das Variáveis Suplementares e Inversão de Transformadas de Laplace no Cálculo da Confiabilidade de Sistemas sujeitos a Envelhecimento e Sob Reparo Mínimo*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- OLIVEIRA, A. L., 2005, *Avaliação do Uso do Método das Variáveis Suplementares para o Cálculo da Confiabilidade de Sistemas sob Envelhecimento*. Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PINHO, M.O., NORIEGA, H.C., FRUTUOSO E MELO, P.F.F., ALVIM, A.C.M., 1999, *Availability of a Component Subject to an Erlangian Failure Model Under Wearout by a Supplementary Variables*. Jr. of the Brazilian Soc. of Mec. Eng., 30, 109-122.
- PINHO, M.O., 2000, *Sobre a Aplicação de Sistemas de Equações Diferenciais de Parciais e Ordinárias de Primeira Ordem à Confiabilidade de Sistemas de Segurança sob Envelhecimento*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PINHO, M.O., FERNANDES, J. L., FRUTUOSO E MELO, P. F. F., ALVIM, A. C. M., 2005, *A New Method for a Reliability Evaluation of Auxiliary Feedwater System by The Supplementary Variables*. INAC 2005- XV ENFIR- Santos-Brasil.
- PINHO, M.O., FERNANDES, J. L., ALVIM, A. C. M., 2006, *Comparative Numerical Evaluation of Angra 1 Auxiliary Feedwater System Reliability by The Supplementary Variables*. III ECM – Lisboa - Portugal.
- RIGDON, S. E., BASU, A. P., 2000, *A Statistical Methods Process*. San Diego Academic Press.
- SALDANHA, P. L. C., 2003, *Uma Aplicação de Processos Pontuais Modulados à Avaliação do Envelhecimento para Extensão da Vida Útil Qualificada de Equipamentos de Centrais Nucleares*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SANT'ANA, M. C., 2006, *Uma Modelagem das Incertezas Associadas a Falhas de Causa Comum considerando Diversidade e Envelhecimento*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SINGH, C., BILLINGTON, R., 1977, *System Reliability Modelling and Evaluation*. London, Hutchinson.

THOMAS, J. W., 1999, *Numerical Partial Differential Equations – Conservation Laws and Elliptic Equations*. New York, Springer.

TVEITO A. W. R., WINTHER R., 1998, *Introduction to Partial Differential Equations: A Computational Approach*. New York, Springer.

10 CFR51, 1991, “*Environmental Protection Regulations for Domestic Licensing and Related Regulatory Functions*”, *Code of Federal Regulation*. Title 10: Energy, Part 51 – 10CFR51, Department of Energy, Washington, DC.

10 CFR54, 1995, “*Requirements for Renewal of Operating Licenses for Nuclear Power Plants*”. Title 10: Energy, Part 54 – 10CFR54, Department of Energy, Washington, DC.