



**UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE
DO SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA
AOS BARRAMENTOS DE SEGURANÇA 1A3 E 1A4 DE ANGRA I**

Ting Yang

**DISSERTAÇÃO E TESE - IEA 093
IEA - DT - 093**

NOVEMBRO/1978

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Klaus Reinach – Presidente

Roberto D'Utra Vaz

Helcio Modesto da Costa

Ivano Humbert Marchesi

Admar Cervellini

PARTICIPANTES

Regina Elisabete Azevedo Beretta

Flávio Gori

SUPERINTENDENTE

Rômulo Ribeiro Pieroni

**UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE
DO SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA
AOS BARRAMENTOS DE SEGURANÇA 1A3 E 1A4 DE ANGRA I**

Ting Yang

**Dissertação para obtenção do Título de "Mestre - Área
Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do
Combustível Nuclear" - Orientador Dr. Roberto Y. Hukal.
Apresentada e defendida em 07 de junho de 1978,
ao Instituto de Energia Atômica**

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO - BRASIL**

INIS Categories and Descriptors

C52

**Angra-1 reactor
Systems analysis
Reactor safety
Electrical equipment
Reliability
Markov processes
Power supplies**

SUMÁRIO

	Página
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações Iniciais	1
1.2 – Objetivos do Trabalho	3
1.3 – Métodos Utilizados em Análise de Confiabilidade	3
1.4 – Sistemas de Suprimento de Energia Elétrica para Centrais Nucleares	5
2 – SISTEMA ELÉTRICO DE ANGRA I	7
2.1 – Sistema Elétrico Externo	7
2.2 – Sistema Elétrico Interno	9
2.3 – Procedimentos de Operação do Sistema de Alimentação dos Barramentos de 4.16 KV	13
2.4 – Sistema Elétrico de Emergência	14
3 – NOÇÕES BÁSICAS DE CONFIABILIDADE	15
3.1 – Conceitos Básicos	15
3.1.1 – Comportamento dos Componentes	15
3.1.1.a – Função Genérica de Confiabilidade	15
3.1.1.b – Primeira Hipótese do Desenvolvimento	16
3.1.2 – Comportamento de Sistemas	19
3.1.2.a – Processos em Tempos Contínuos	19
3.1.2.b – Processos em Tempos Discretos	22
3.1.2.c – Estados Absorventes	24
3.2 – Terminologia	24
4 – O MODELO TEÓRICO	26
4.1 – Descrição Sucinta do Modelo	26
4.2 – Procedimento de Cálculo	27
4.2.1 -- Cálculo de Frequência de Falhas	33
4.2.2 -- Cálculo da Duração Esperada	33
4.2.3 -- Cálculo das Probabilidades Transitórias	34
4.3 – Determinação dos Parâmetros de Confiabilidade (λ_g e μ_g) das Fontes	34
4.3.1 – Sistemas Santa Cruz Via 138 KV	34
4.3.2 – Determinação dos Parâmetros de Confiabilidade do Sistema Furnas	42
4.3.2.1 – Conceitos Genéricos do Método	42

4.3.2.1.a – Probabilidade das Condições (Operante e Inoperante)	43
4.3.2.1.b – Estados Compostos	44
4.3.2.1.c – Eventos que Acarretam uma Interrupção	44
4.3.2.1.d – Probabilidade de um Estado Composto	44
4.3.2.1.e – A Frequência de uma Transição	45
4.3.2.2 – Procedimento de Cálculo	45
4.3.2.2.a – Frequência das Interrupções	45
4.3.2.2.b – Durações Esperadas das Interrupções	48
4.3.2.2.c – Cálculo de Efeito da Falha de Cada Elemento Sobre um Nó k	48
4.3.2.3 – Programa Computacional	49
4.3.2.4 – Resultados	49
4.3.3 – Determinação dos parâmetros de Confiabilidade do Sistema Diesel	51
5 – RESULTADOS E CONCLUSÕES	52
5.1 – Frequência e Duração Esperada de Perda de Energia nos Barramentos de 4.16 KV ...	52
5.2 – Probabilidade de Falha do Sistema de Suprimento	52
5.3 – Análise de Sensibilidade	53
5.4 – Conclusões e Recomendações	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA AOS BARRAMENTOS DE SEGURANÇA 1A3 E 1A4 DE ANGRA I

Ting Yang

RESUMO

Estudou-se a confiabilidade do sistema de suprimento de energia para uma central nuclear, enfatizando, em particular, o sistema Nuclear de Angra I.

Inicialmente, foi feita uma estimativa de confiabilidade de cada fonte alimentadora que compõe o sistema. Admitindo que as fontes tenham um comportamento Markoviano, utilizou-se um método probabilístico para avaliar a confiabilidade da alimentação dos barramentos de segurança 1A3 e 1A4 de 4,16 KV, em termos de frequência e duração esperada de uma falha no suprimento de energia elétrica a esses barramentos, e foi estimado tempos recomendáveis de um reator continuar em operação quando o sistema se encontrar em estados degradados sem comprometer a segurança da Central.

Foi feita também uma análise de sensibilidade do sistema com relação aos componentes que contribuem para o suprimento. Baseado nesta análise, conclui-se que os sistemas diesel assumem um papel primordial no desempenho do sistema de suprimento de energia elétrica a uma central nuclear.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Iniciais

Com a crescente adoção de usinas nucleares para produção de energia elétrica no mundo (mais de 250.000 MWe comprometidos), os problemas de segurança dessas usinas tornaram-se pontos focais de atenção para os engenheiros nucleares, na atualidade.

Nos primórdios da geração elétrica via nuclear, as atenções voltaram-se principalmente sobre os aspectos neutrônicos do reator nuclear, dado o desconhecimento natural da cinética de reatores pelos engenheiros de então. Com o avanço da tecnologia nuclear e quase perfeito conhecimento do comportamento transiente dos reatores, as atenções voltaram-se então para o circuito primário do refrigerante e os aspectos de contenção primária e secundária da radiação em casos de acidentes.

Hoje, as pesquisas sobre segurança de usinas nucleares voltam-se para os sistemas periféricos da "ilha nuclear", notadamente, após os trabalhos de Rasmussen e colaboradores⁽³⁵⁾ que deixaram à mostra a influência desses sistemas no comportamento dos sistemas primários da usina. Assim, por exemplo, pesquisas são feitas sobre acidentes no sistema secundário e sua influência na dinâmica do sistema primário. Os aspectos químicos da água de refrigeração do condensador são um motivo de preocupação dado a sua influência no comportamento dos materiais do circuito secundário e do gerador de vapor dos PWR.

Um outro exemplo importantíssimo é o do sistema de suprimento de energia elétrica dentro da própria usina nuclear. Os estudos de Rasmussen indicam que uma perda total e repentina do suprimento

Aprovada para publicação em Junho/1978

de energia elétrica para uma usina nuclear, o que implica no desligamento do próprio reator, potencialmente, poderá iniciar os eventos para a ocorrência do mais grave tipo de acidente concebível para o PWR. Felizmente, a probabilidade de ocorrência desse tipo de acidente, o acidente chamado de PWR-1, é das mais baixas, da ordem de 10^{-9} por reator-ano. Contudo, a óbvia importância desse problema atrai a atenção dos pesquisadores da engenharia de segurança das usinas nucleares.

Na análise desse problema, um dos principais instrumentos da estatística aplicada disponível é a teoria da confiabilidade.

A confiabilidade de sistemas de potência vem sendo estudada extensivamente há muitos anos, como pode ser verificado pelo grande número de trabalhos divulgados nessa área. Desse modo, as análises feitas abrangem tanto sistemas de geração e transmissão de energia, como sistemas compostos de subsistemas interconectados.

Com o elevado número de reatores em funcionamento e em construção, o estudo da confiabilidade de sistemas de potência se tornou ainda mais relevante não só devido ao alto nível de investimentos envolvido em tais centrais como também devido aos riscos potenciais à população inerentes à operação das mesmas.

Uma central nuclear possui sistemas, dispositivos e equipamentos que exigem energia elétrica para colocá-los em operação nas mais diversas condições. Em operação normal, essa energia alimenta os sistemas de refrigeração, monitoração, sistemas de controle, iluminação e outros serviços rotineiros. Em condições de emergência ela aciona os sistemas e dispositivos de segurança, denominados de CLASSE IE, que asseguram um desligamento forçado seguro do reator num eventual acidente. Após o desligamento, o calor residual, proveniente do decaimento radioativo dos produtos de fissão, correspondendo inicialmente a cerca de 7% da potência normal de operação do reator, deve ser removido de modo que a elevação da temperatura dentro do núcleo não provoque a fusão dos elementos estruturais, evitando-se assim a liberação de materiais radioativos para o exterior da central.

Portanto, além do aspecto de geração e transmissão de energia elétrica, fundamental nos estudos de confiabilidade de usinas convencionais, para uma usina nuclear torna-se imprescindível a análise da confiabilidade do suprimento de energia elétrica para os dispositivos de segurança da central.

Na realidade estes aspectos estão intimamente relacionados, pois uma baixa disponibilidade do sistema de geração ou de transmissão para a rede externa, acarreta em um maior número de desligamentos do reator, o que leva a exigir uma maior utilização dos dispositivos de segurança.

Transientes de tensão, perda das linhas e outras ocorrências dentro da rede à qual a estação é conectada podem causar perda de carga, o que forçosamente leva a um desligamento do reator. Dessa maneira o estudo de perda de carga é um fator primordial num estudo de confiabilidade de uma central nuclear, merecendo uma análise à parte.

Um dos eventos que causa maior preocupação nos estudos de segurança de reatores nucleares é a falha do suprimento de energia elétrica no instante ou no decorrer de um acidente de perda de refrigerante, denominado LOCA (*Loss Of Coolant Accident*).

A Figura 1.1 mostra a evolução de temperatura do encamisamento e de pressão do sistema no decorrer de um LOCA. Uma não disponibilidade do suprimento de energia elétrica aos dispositivos de refrigeração de emergência durante este período, pode levar a fusão do encamisamento dentro de um curto período de tempo⁽⁴⁾.

Além disso o evento de um LOCA acarreta em um rápido desligamento do gerador, resultando numa repentina perda de geração de usina. Se esta perda repentina de geração exceder o limite de estabilidade do sistema externo ao qual a central é conectada, o sistema de transmissão de rede externa

com a central será interrompido, resultando na perda de uma fonte externa, aumentando assim os efeitos que um desligamento do reator pode ter sobre a confiabilidade do sistema de suprimento de energia elétrica para a central nuclear⁽²⁶⁾.

Sob estes pontos de vista, projetos de usinas nucleares exigem um sistema de suprimento de energia elétrica altamente confiável.

Nesse trabalho dar-se-á enfoque ao aspecto que compromete diretamente a segurança da central, especificamente como será visto mais adiante, à confiabilidade de suprimento de energia elétrica aos barramentos de segurança de 4.16 KV.

1.2 – Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de análise que permita avaliar a confiabilidade de sistemas de suprimento de energia elétrica para centrais nucleares, focalizando em particular o sistema de alimentação da usina nuclear de ANGRA I.

O método utilizado, baseado em processos Markovianos, permite avaliar a confiabilidade do sistema de suprimento de energia elétrica aos barramentos de segurança em função da frequência de falhas, da duração média de falha, e do tempo admissível do reator continuar em operação, quando uma ou mais fontes de suprimento não estiverem disponíveis, de modo que a probabilidade de ocorrer uma perda total de energia elétrica (*black-out*) da central não ultrapasse um limite aceitável.

O modelo da análise leva em conta desde a influência da localização da central dentro da rede de transmissão, até o desempenho do sistema de distribuição interna na alimentação das cargas de segurança.

Devido a incerteza dos dados estatísticos utilizados, é realizada uma análise de sensibilidade, tentando remediar esse aspecto negativo, focalizando com maior atenção os dados menos confiáveis, além de determinar a contribuição de cada componente no desempenho do sistema de suprimento.

1.3 – Métodos Utilizados em Análises de Confiabilidade

Em meados da década de 30, os parâmetros de confiabilidade, a frequência e a probabilidade de interrupção, foram apresentados nos trabalhos relacionados com o planejamento de sistemas de transmissão e de geração para melhorar a confiabilidade de sistemas de potência⁽³⁷⁾.

Um dos primeiros métodos probabilísticos para avaliar a confiabilidade de sistemas de transmissão foi desenvolvido por Tood, o qual determinou a probabilidade de paradas forçadas de um ou mais componentes conectados em série, e a probabilidade de paradas simultâneas dos componentes conectados em paralelo.

Barlow e Hunter, e DeSieno e Stine⁽¹⁸⁾, foram os primeiros a apresentar um procedimento, hoje bastante desenvolvido, que emprega a álgebra booleana e séries de Markov, admitindo os componentes reparáveis, para avaliar a confiabilidade de sistemas de transmissão e de geração⁽¹⁸⁾. Este procedimento trata o sistema com componentes arranjados em série e/ou em paralelo, e assume a densidade de distribuição de falha e reparo dos componentes sob a forma exponencial. Um método de probabilidade condicional com auxílio de cadeias de Markov⁽³⁾ foi apresentado para calcular a confiabilidade do suprimento a pontos de carga de uma rede levando em conta interrupções forçadas das fontes de suprimento e do sistema de transmissão.

Mais tarde, vários trabalhos foram apresentados, levando em conta os efeitos de meio ambiente e de saídas programadas para manutenção^(23,28). Ao mesmo tempo análises mais teóricas utilizando processos de Markov foram desenvolvidas^(8,6).

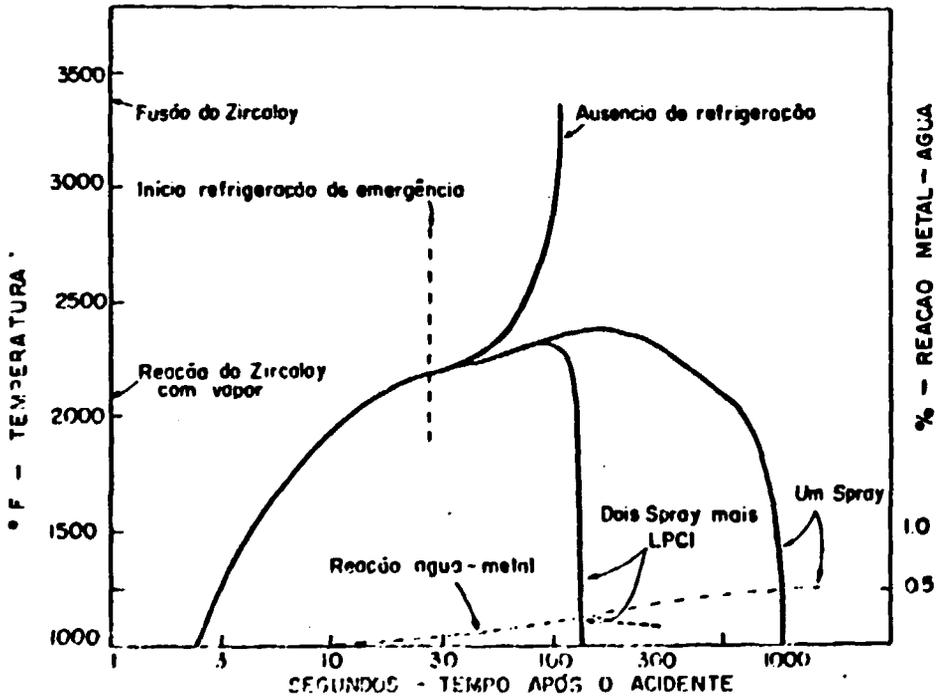


Figura 1.1 - Comportamento do Núcleo Após um LOCA

Um método alternativo para predições mais realísticas e exatas de confiabilidade de sistemas de potência é a técnica denominada Modos de Falha e Análise dos Efeitos. Vários trabalhos têm sido publicados empregando este procedimento, aplicado em sistemas de distribuição⁽²²⁾, em subestações^(1,25,24), e em redes de transmissão⁽⁵⁾. Este método leva em conta mais condições dos componentes, permitindo determinar a frequência das interrupções transitórias e seus respectivos tempos necessários para a restauração do serviço.

Para o cálculo dos parâmetros de confiabilidade do sistema de alimentação de Santa Cruz, considerado neste trabalho, utilizar-se-á a mesma linha de cálculo empregado nas referências^(30,37,27).

Métodos de avaliação com respeito a confiabilidade de sistemas de suprimento de energia para centrais nucleares encontradas na literatura, baseiam-se essencialmente em duas técnicas: pelo método de árvore de falha e o modelo de Markov.

O método por árvore de falha vem sendo empregado por Rasmussen, para avaliação de sistemas nucleares publicados em relatórios de análise de segurança⁽³⁵⁾. Especificamente, a análise de confiabilidade do sistema de suprimento de energia para centrais nucleares foi brevemente abordado nestes relatórios. Estudos mais detalhados, utilizando o mesmo procedimento, foi feito na Itália⁽³¹⁾ e no Brasil para a Central Nuclear de Angra I pelo Borba⁽¹²⁾.

Por outro lado, o emprego do modelo de Markov em análise de confiabilidade de sistemas de suprimento de energia elétrica para centrais nucleares foi estudado com maior intensidade pelos franceses^(12,11).

A utilização de sistemas diesel em instalações nucleares como uma fonte de emergência assume um importante papel para a segurança de centrais nucleares. Portanto, vários trabalhos tem sido desenvolvidos nos últimos anos, com relação ao desempenho dos geradores diesel.

Em 1972, Foley⁽²⁰⁾ publicou resultados dos testes feitos com os sistemas diesel para verificar a sua eficiência diante dos requisitos exigidos por uma instalação nuclear, determinando o tempo de partida, o número de partidas sustentadas pelo tanque de ar comprimido, as variações de voltagens e de frequência quando é conectada carga de grande porte, e outros.

Em 1974, foi feito um levantamento de dados de falha, obtidos pelas experiências operacionais dos 51 geradores diesel instalados em 29 usinas nucleares desde 1959 até 1973, com o propósito de identificar a natureza e a causa das falhas, além de estimar a probabilidade de falha dos geradores diesel⁽¹⁷⁾.

E finalmente, Borst, em 1976⁽¹³⁾ fez um estudo comparativo entre os sistemas americanos e os sistemas alemães, enfatizando a importância de sistemas diesel no sistema de suprimento de energia elétrica para as centrais nucleares.

1.4 – Sistemas de Suprimento de Energia Elétrica Para Centrais Nucleares

O sistema de suprimento de energia para centrais nucleares é baseado na tecnologia de usinas convencionais⁽³⁹⁾. Numa usina de combustível fóssil, no caso da ocorrência de um rápido desligamento da caldeira ou da turbina, certas cargas são essenciais com respeito a segurança da usina, tais como, a bomba de alimentação da caldeira, a bomba de óleo da turbina, que devem ser religadas dentro de alguns segundos para evitar danos nos equipamentos. Considerando estes fatos foram criados sistemas redundantes, e uma dessas aplicações é adicionar um sistema de suprimento de energia elétrica independente.

Durante a operação normal de uma usina, por razões econômicas, o suprimento às cargas internas da central nuclear provém do seu próprio gerador. Assim, em princípio, uma usina exigiria

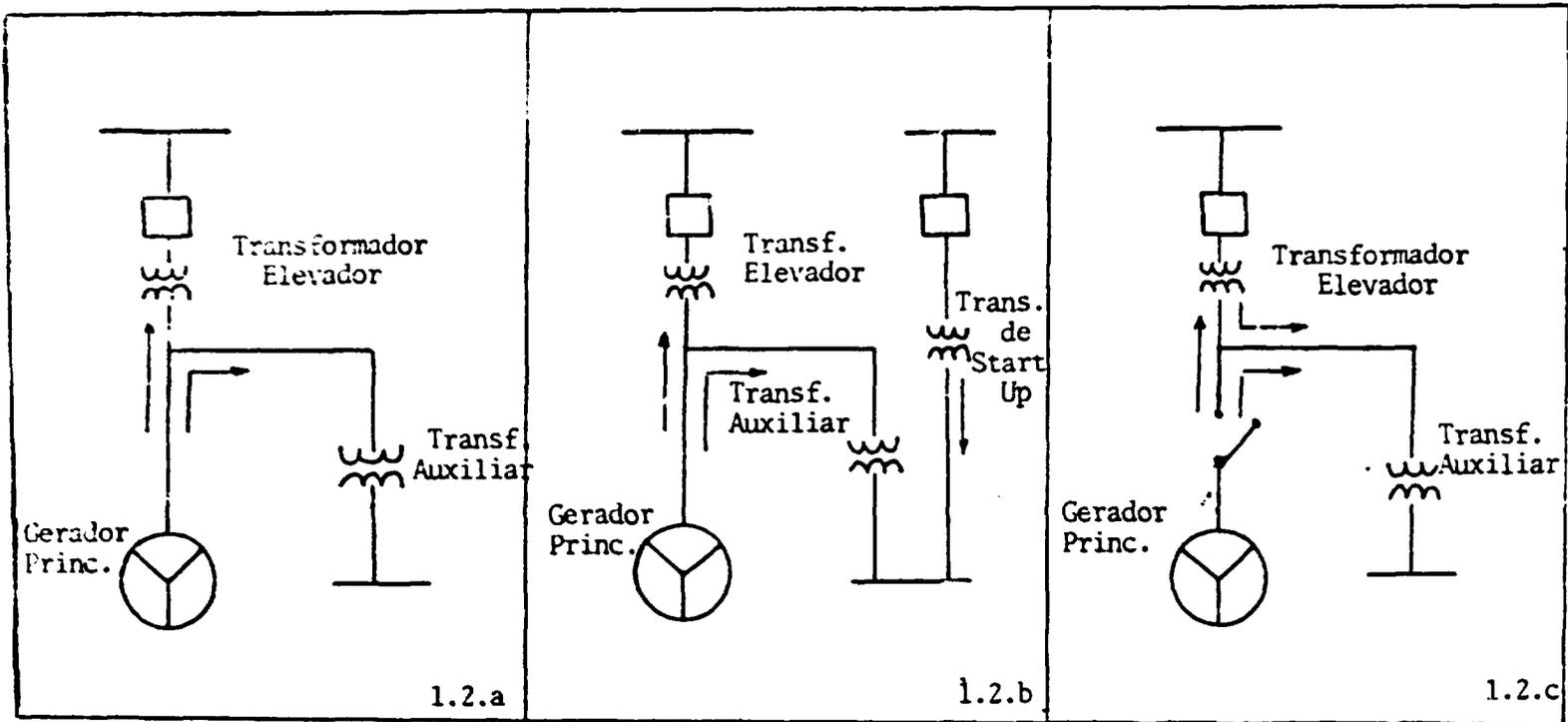


Figura 1.2 - Sistema de Suprimento

apenas uma conexão com a rede externa de transmissão pela qual seria conduzida a energia gerada na usina. Um sistema descrito acima é mostrado na Figura 12a. Entretanto, por razões de operação, a usina necessita de um outro suprimento de energia durante a sua partida ou seu desligamento. Isto é conseguido, conectando-se diretamente uma segunda linha que liga a rede externa com a usina, ou inserindo-se um disjuntor de carga na saída do gerador, permitindo suprir as cargas internas pela linha que conduziria a energia gerada pela usina durante uma partida ou um desligamento ou mesmo na ocorrência de uma falha ou um rápido desligamento do gerador, conforme mostrado nas Figuras 1.2b e 1.2c.

Até este estágio, o desenvolvimento de sistemas de suprimento de energia elétrica em usinas nucleares é basicamente semelhante ao sistema de usinas convencionais. Todavia, como acidentes em usinas nucleares oferecem potencialmente maior perigo que em usinas convencionais, as exigências para segurança são muito mais rigorosas em sistemas nucleares.

Torna-se necessário além da instalação de unidades de suprimentos de emergência de geradores diesel em centrais nucleares, cuja finalidade é adquirir uma fonte alternativa de energia, (no caso de ocorrer perda das fontes externas simultâneas a ocorrência de um acidente no reator, que acarreta imediatamente o desligamento deste); a utilização de um sistema de distribuição adicional redundante, elétrica e fisicamente independentes a separação das cargas de segurança em grupos de cargas também independentes e redundantes.

A demanda de carga de emergência aumenta com o porte da central, assim para centrais cuja potência supera 1000 MW, é necessário que o sistema de distribuição tenha um maior grau de redundância. Por outro lado, todas estas considerações afetam o aspecto econômico do projeto de uma central nuclear.

A análise de segurança de sistemas elétricos de potência propostos para a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto foi realizada baseando-se principalmente na conformidade com: Resolução NEN 6/72 "Normas de Licenciamento de Reatores Nucleares de Potência". Critérios Gerais de Projeto (CGP) (apêndice A do Código de Regulamentos Federais dos EUA, 10 CFR 50); Guias Regulatórios da Comissão Regulatória Nuclear Americana (RG) e Padrões do Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônicos (IEEE Std 308 - 1971).

2 - O SISTEMA ELÉTRICO DE ANGRA I

Apresenta-se aqui somente uma descrição sucinta do sistema elétrico de Angra I, levando em conta apenas os componentes que afetam diretamente os resultados da análise proposta.

2.1 - Sistema Elétrico Externo

A Central Nuclear Angra I é interligada com a rede de transmissão, através de dois conjuntos de linhas de transmissão, um de 500 KV e outro de 138 KV.

O sistema de 500 KV consiste em duas linhas de 500 KV, uma interligando a Central com a subestação de Cachoeira Paulista (80 km) e outra com a subestação de Adrianópolis (120 km), pelas quais normalmente é conduzida a energia gerada na Usina de Angra I para a rede externa, podendo ser utilizada como uma fonte alternativa nas cargas auxiliares e de segurança da Central Nuclear de Angra.

Uma subestação de 500 KV, tipo anel, no seu primeiro estágio provê terminais para as duas linhas de 500 KV. Posteriormente, mais linhas de 500 KV serão instaladas, quando as novas unidades, Angra II e III forem construídas. A Figura 2.1 mostra o diagrama unifilar da subestação de 500 KV.

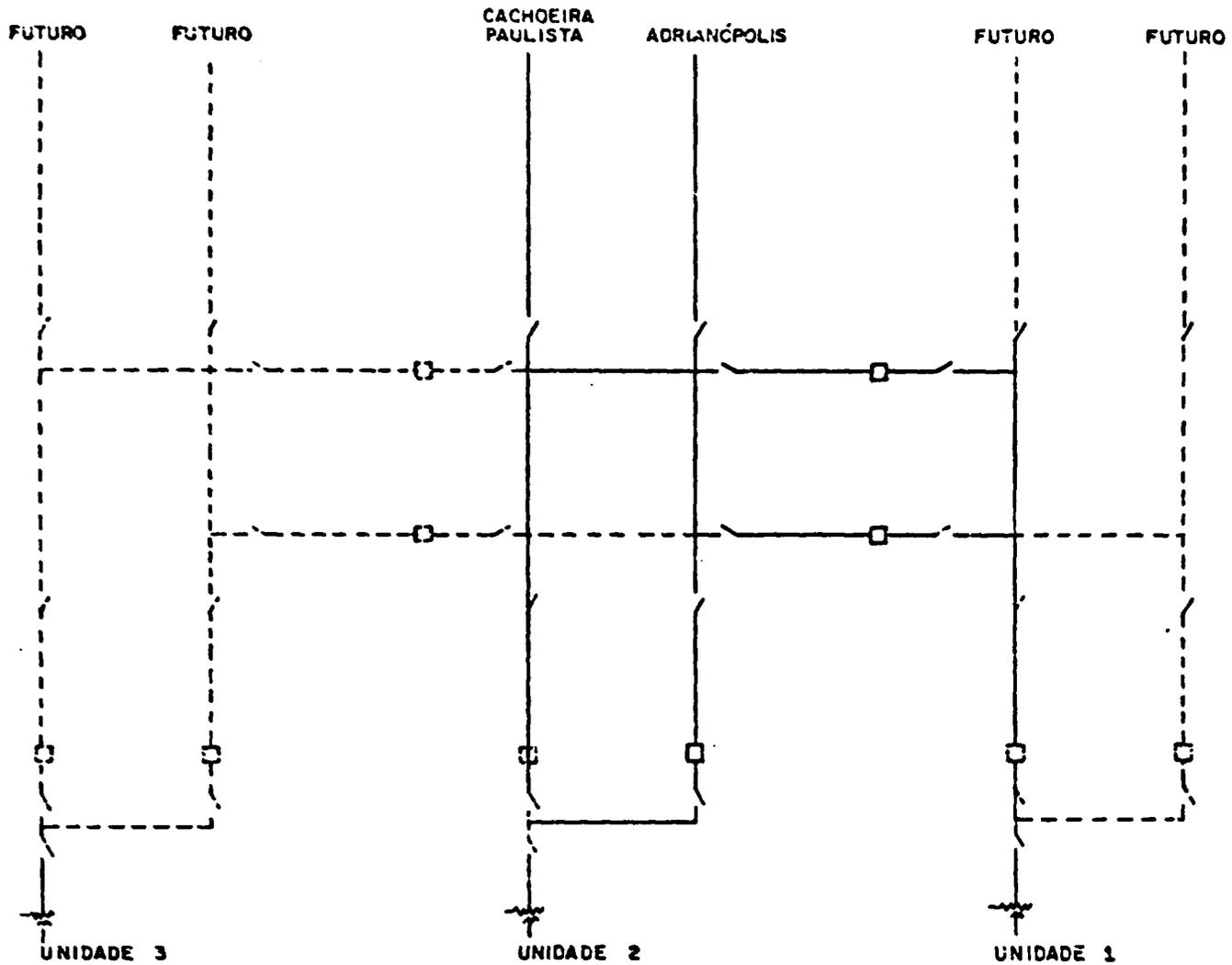


Figura 2.1 - Subestação de 500 KV

O sistema de 138 KV consiste de duas linhas de 138 KV, uma de circuito duplo e outro simples, que interligam a Central com a usina termoeletrica de Santa Cruz (80 km). Estas linhas conduzem a energia elétrica consumida na região de Angra dos Reis, em particular, podem alimentar as cargas auxiliares da Central. Primordialmente, contudo, é considerado a fonte preferencial de alimentação das cargas de segurança da Central, independentemente do Gerador Principal e do sistema de 500 KV.

Uma subestação de 138 KV, tipo barramento duplo, alimentada por três circuitos de 138 KV. A subestação provê terminais para 3 cabos de saída: um cabo alimenta o transformador T1A2 da Central e outros dois alimentam cargas de outros serviços. A Figura 2.2 mostra o diagrama unifilar da subestação de Itaorna de 138 KV.

A usina térmica de Santa Cruz colocada em operação em 1967 com 2 unidades de 82 MWe e atualmente é composta de 06 unidades geradoras: 2 geradores de 218 MWe, 2 geradores de 82 MWe e 4 geradores de turbina a gás de 11 MWe, totalizando uma potência máxima de 644 MWe.

As interligações do sistema de Furnas está ilustrada na Figura 2.3.

2.2 – Sistema Elétrico Interno

Basicamente, o sistema de distribuição elétrica para a Usina de Angra consiste do Gerador Principal, dos transformadores Principal, Auxiliar e de Serviço, barramentos de serviço e de segurança, geradores diesel, bancos de baterias, carregadores de baterias, inversores e todo equipamento necessário para interconexão do sistema auxiliar.

O sistema de distribuição desempenha as funções de gerar e suprir o seu próprio sistema auxiliar, sistema esse que alimenta o sistema de controle, proteção, instrumentação, bombas, aquecedores elétricos, iluminação etc.

O diagrama unifilar simplificado do sistema de distribuição é mostrado na Figura 2.4.

Dois barramentos de serviço denotados por 1A1 e 1A2 e dois barramentos de segurança 1A3 e 1A4, ambas em 4,16 KV normalmente são alimentados por duas fontes independentes, uma para cada serviço, sendo que cada uma destas fontes tem a capacidade de alimentar ambos os serviços.

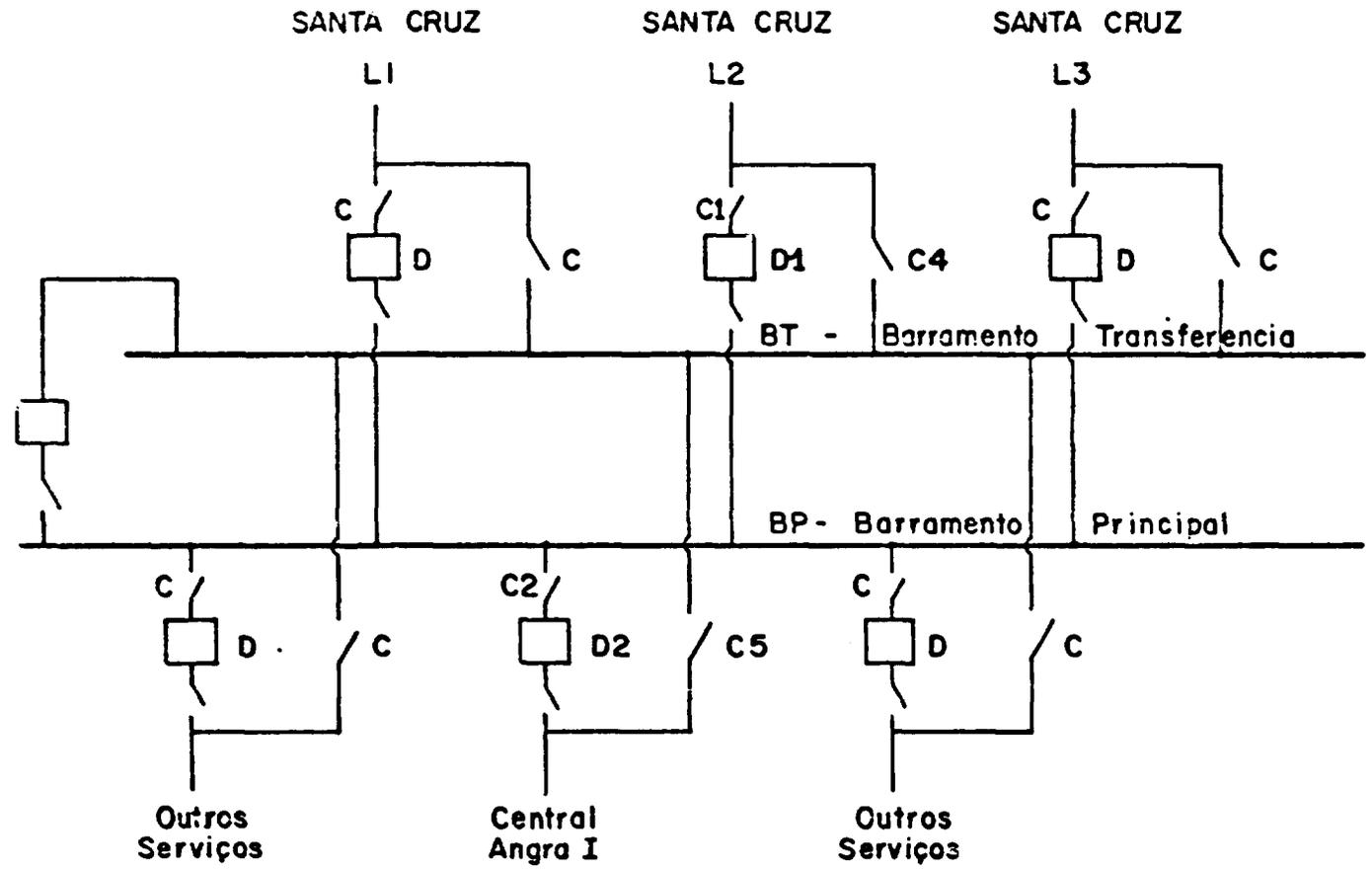
A alimentação destas barras pode ser feita pelo secundário de dois transformadores, auxiliar (T1A1) e de serviço (T1A2), ambas de 3 enrolamentos, sendo que cada enrolamento secundário alimenta um conjunto de duas barras, uma de serviço e outra de segurança.

O transformador de Serviço da Usina (T1A2) de relação 138/4,16 KV é alimentado pelo sistema de 138 KV, por intermédio da subestação de Itaorna.

O transformador auxiliar da unidade T1A1 de relação 19/4,16 KV pode ser alimentado pelo próprio gerador ou pelas linhas de 500 KV, por intermédio do transformador principal T1 através da subestação 500 KV, vindas de Cachoeira Paulista ou Adrianópolis com o Gerador Principal desconectado pela chave "LOAD BREAK".

BARRAMENTO DE SERVIÇO

Os barramentos 1A1 e 1A2 alimentam todas as cargas de serviço da usina não relacionada com a segurança. Três fontes de energia podem alimentar os barramentos: o gerador principal, sistema Santa Cruz e Sistema Furnas via 500 KV. Em funcionamento normal, a fonte que alimenta as barras de serviço da usina é o próprio gerador principal (G1), pelo transformador auxiliar (T1A1) sendo o transformador



**Barramentos de Segurança
1A3 e 1A4**

Figura 2.2 - Subestação de Itorna - 138 KV

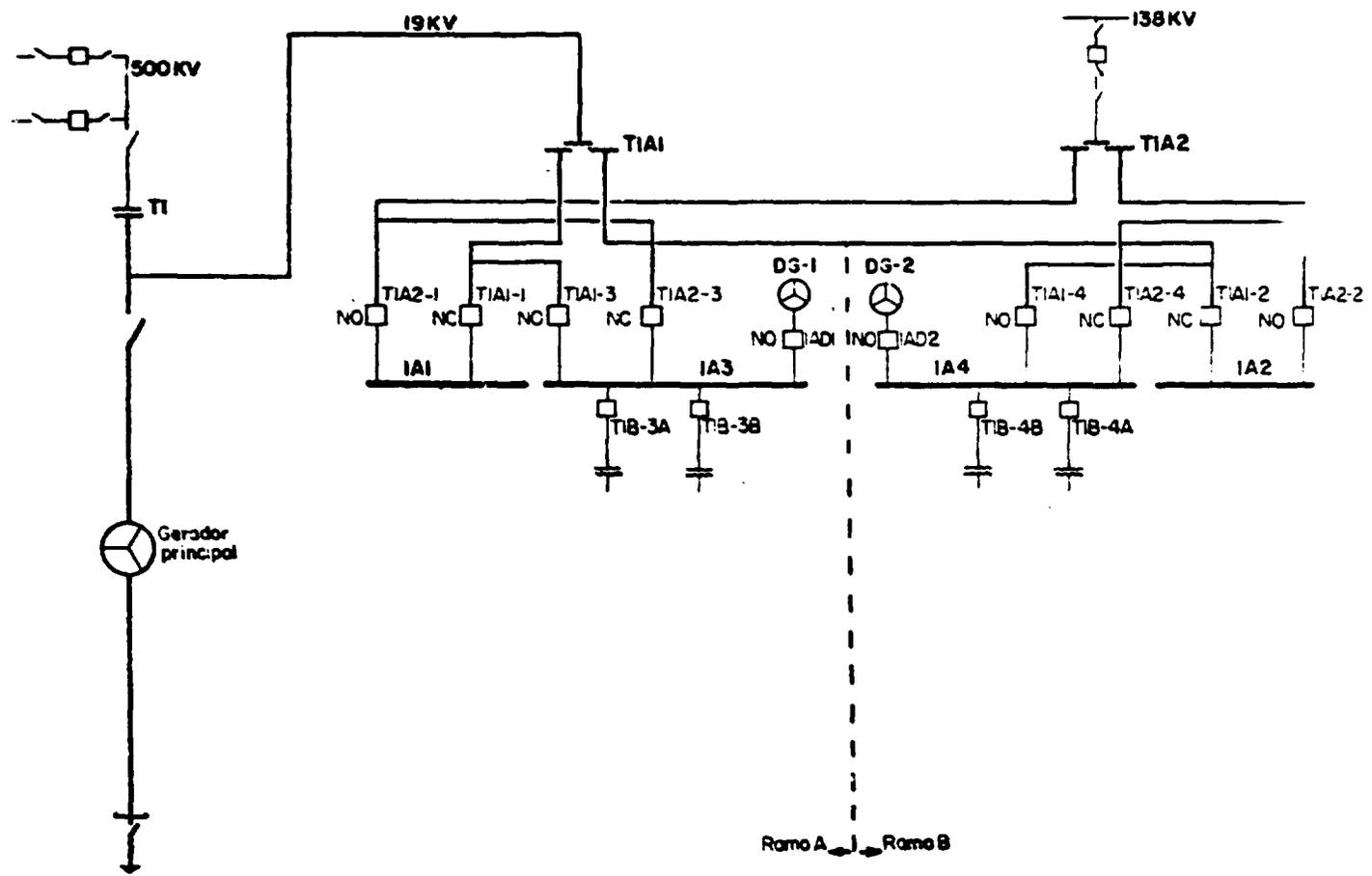


Figura 2.4 - Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico de ANGRA I

de serviço (T1A2) uma alternativa do sistema. No evento da perda de alimentação preferencial existe a provisão para uma alimentação vinda da subestação de 138 KV, através de uma transferência automática dos disjuntores de alimentação das barras.

Como uma "reserva" do sistema, existe a realimentação das barras pela linha de 500 KV, vinda da rede de Furnas.

BARRAMENTO DE SEGURANÇA

Os barramentos 1A3 e 1A4 são considerados componentes de CLASSE IE, neles estão conectadas todas as bombas e cargas necessárias para o completo desligamento seguro do reator.

Sistemas auxiliares com mais de 250 HP são supridos pelos barramentos de 480 V. Estes barramentos serão energizados pelo secundário dos transformadores abaixadores 4160/480 V. Os sistemas auxiliares acima de 100 HP são ligados diretamente aos barramentos de 480 V por meio de disjuntores a ar.

Os barramentos de segurança (1A3 e 1A4) são normalmente alimentados pela subestação de 138 KV através do transformador abaixador T1A2. Caso falte esta alimentação, ocorrerá uma transferência automática de alimentação para a linha de 500 KV. Os barramentos de segurança são conectados a 2 Geradores Diesel (um para cada barra) que servem como uma alimentação de emergência que será descrita na Secção 2.4. O sistema de distribuição procedente do barramento 1A3 passa pelo ramo A enquanto que do barramento 1A4 passa pelo ramo B.

Após uma partida, ou antes de um desligamento da Central, ou no evento de uma perda de suprimento normal, é efetuada a transferência de carga, da fonte perdida para a fonte remanescente, no caso da perda da fonte preferencial.

Uma transferência automática pode ser efetuada por 2 maneiras.

- Transferência rápida é efetuada com o barramento energizado e com um tempo morto de 6 a 8 ciclos. Para este tipo de transferência é necessário que anteriormente à falha, as fontes estivessem em condições de sincronismo e a diferença de tensão entre fases num valor aceitável, podendo a transferência ser bloqueada por não corresponder a qualquer uma das condições citadas.
- Transferência lenta substitui a transferência rápida, quando esta última foi bloqueada. A transferência é feita com o barramento desenergizado. O sucesso da transferência depende da queda da tensão residual para valores seguros antes da reenergização.

Se a transferência lenta não obtiver sucesso, os barramentos serão energizados pelos seus respectivos geradores diesel, os quais foram previamente ligados.

2.3 – Procedimento de Operação do Sistema de Alimentação dos Barramentos 4,16 KV

A operação do sistema depende das condições de operação do reator. Existem dois casos principais:

Caso A: Na PARTIDA DA USINA, em condição de DESLIGAMENTO PARA RECARREGAMENTO, em condições de DESLIGAMENTOS QUENTES e FRIOS; em condições CRÍTICO (potência zero), e em RECARREGAMENTO.

Os barramentos 1A1 e 1A2 são alimentados pelo sistema de 500 KV via transformador principal T1 e transformador auxiliar da unidade T1A1, e os barramentos auxiliares de segurança 1A3 e 1A4 são alimentados pelo sistema de 138 KV via transformador de serviço da usina T1A2.

Como uma alimentação alternativa, todo o sistema auxiliar pode ser alimentado somente por uma fonte externa, sistema 138 KV ou sistema 500 KV.

Caso B: Em condição de OPERAÇÃO EM POTÊNCIA:

Uma vez que o reator crítico esteja em condições de 'pegar' a carga, faz-se o paralelismo do gerador com o sistema (na condição precedente) na alimentação dos barramentos 1A1 e 1A2 (com os disjuntores T1A1-2, T1A1-1, T1A2-1 e T1A2-2 fechados) para serem alimentados posteriormente pelo gerador principal.

As barras de segurança 1A3 e 1A4 são alimentadas pelo sistema 138 KV via transformador de serviço da usina T1A2.

2.4 – Sistema Elétrico de Emergência

A Central dispõe de dois geradores diesel, cada um conectado a um barramento de segurança (1A3 e 1A4), por meio de disjuntores 1AD1 e 1AD2, respectivamente.

Cada unidade diesel é física e eletricamente independente do outro e capaz de suprir toda a carga necessária (de um ramo) para um desligamento seguro no evento de um acidente.

O gerador é capaz de operar por um longo período de tempo com uma demanda não superior a 2850 KW, dependendo somente da disponibilidade do óleo combustível, e com um fator de potência de 80%. Em situações mais rigorosas, ele é capaz de operar por um período de 2000 horas com uma demanda de 3100 KW, e por 30 minutos com uma demanda de 3500 KW.

A partida do diesel é acionada automaticamente, no evento da perda de uma fonte externa, ou com um sinal para injeção do refrigerante de segurança, ou uma indicação de baixa tensão no barramento. Ele também pode ser acionado manualmente da sala de controle ou no próprio gerador do diesel.

A partida do diesel é acionada por um sistema de ar comprimido, com capacidade de executar seis partidas consecutivas. O gerador consegue alcançar sua velocidade nominal e pronto para receber carga em menos de 10 segundos após receber o sinal de partida. Ele suporta uma queda de voltagem não superiores a 25% do seu valor nominal, e dessa maneira as cargas são divididas em grupos e colocadas em operação, sequencialmente.

O tanque do óleo combustível tem a capacidade de suprir, continuamente em plena carga, as necessidades durante um período de 4.5 dias, podendo ser reabastecido durante este tempo.

Um 'LOCA' ou uma ruptura no circuito de vapor são considerados sinais para injeção do refrigerante de segurança. Após receber um sinal para injeção de segurança inicia-se o processo de desligamento do reator, partida dos motores diesel e os dispositivos específicos de segurança são acionados. No caso de uma perda de voltagem no barramento 1A3 ou 1A4, e se a transferência automática não for conseguida, eles são automaticamente isolados e, após os geradores diesel alcançarem a velocidade nominal, os disjuntores 1AD1 e 1AD2 são fechados e as cargas são sequencialmente colocadas em operação. O sistema sequencial automático permite colocar todas as cargas necessárias em operação em menos de 40 segundos.

A descrição dos dispositivos específicos de segurança pode ser encontrada na referência⁽¹²⁾.

Maiores detalhes sobre o sistema de carga sequencial pode ser encontrado nas referências^(21,14)

3 – NOÇÕES BÁSICAS DE CONFIABILIDADE

3.1 – Conceitos Básicos

Alguns conceitos básicos, necessários para uma avaliação quantitativa da confiabilidade de sistemas de potência, serão expostos a seguir.

3.1.1 – Comportamento dos Componentes

Para cada componente do sistema podemos admitir duas condições: OPERANTE e AVARIADO. Com o decorrer do tempo, cada componente executa transição de uma condição para outra. Definimos por *falha*, a transição da condição operante para a condição avariado e definimos por *reparo*, a transição da condição avariado para a condição operante.

CONDIÇÃO	TRANSIÇÃO	CONDIÇÃO	DENOTAÇÃO
OPERANTE	→	AVARIADO	→ FALHA
AVARIADO	→	OPERANTE	→ REPARO

3.1.1.a – Função Genérica de Confiabilidade

Seja uma amostra de N_0 componentes idênticos, $N_s(t)$ o número de componentes ainda em operação no tempo t e $N_f(t)$ o número de componentes falhos (avariados) no tempo t . Então, a confiabilidade $R(t)$ do componente no tempo t pode ser definida por:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0}$$

$$= \frac{N_0 - N_f(t)}{N_0} = 1 - \frac{N_f(t)}{N_0}$$

Derivando a função confiabilidade com relação ao tempo:

$$d \frac{R(t)}{dt} = - \frac{1}{N_0} d \frac{N_f(t)}{dt} = - f(t)$$

Define-se $f(t)$ como função de densidade de falha com o tempo t .

Seja $\lambda(t)$, a taxa de falha por componente em operação em função do tempo. Então:

$$\begin{aligned} \frac{1}{N_f(t)} \frac{d N_f(t)}{dt} &= \lambda(t) \\ &= \frac{N_o}{N_o} \frac{d N_f(t)}{dt} \frac{1}{N_f(t)} = \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{1}{R(t)} \frac{d R(t)}{dt} \end{aligned}$$

Tem-se:

$$\lambda(t) = - \frac{1}{R(t)} \frac{d R(t)}{dt}$$

$$\int_0^t \lambda(t) dt = - \int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} d R(t) \Rightarrow R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (3.1)$$

3.1.1.b – Primeira Hipótese do Desenvolvimento

“Todo componente tem a taxa de falha constante no tempo”.

Uma expressão muito utilizada em estudos de confiabilidade é a probabilidade de um componente permanecer funcionando por um período de tempo quando o componente tem uma taxa de falha constante. Esta hipótese restringe o comportamento dos componentes a uma classe particular de processos denominados Markovianos.

A confiabilidade do componente é dada pela equação 3.1:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] = \exp(-\lambda t) \quad \text{para } \lambda(t) = \lambda$$

E a sua função de densidade de falha torna-se:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$$

Em outras palavras, admite-se que a função de densidade de falha tem a forma exponencial.

A experiência mostra que a variação de taxa de falha com o tempo para a maioria dos componentes do sistema, tem a seguinte forma, mostrada na Figura 3.1.

A elevada taxa de falha dos componentes na região (I) é devido a erros de projeto, de fabricação, ou de montagem que acarretarão falhas durante o período inicial de suas operações, isto é,

na fase de adaptação do componente com o sistema. O aumento da taxa de falha na região (III) é devido a desgaste dos componentes. Falhas na região (II) são causadas por fatores independentes da idade dos componentes (ocorrências da natureza e condições alheias)⁽⁹⁾.

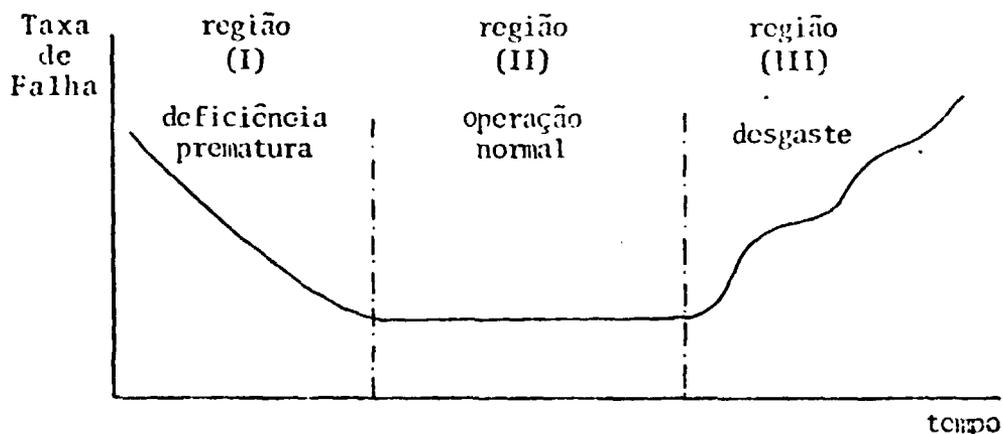


Figura 3.1 – Características da Taxa de Falhas de Componentes Elétricos

A hipótese anterior é válida na região (II) da vida do componente, onde a taxa de falha dos componentes se mantém praticamente constante.

Esta hipótese será válida ao se admitir que existe um sistema de manutenção preventiva periódica, bem distribuída, de tal maneira que os componentes sejam substituídos ou reparados, antes que eles atinjam a região (III), resultando assim uma taxa de falha praticamente constante por um longo período de tempo (Figura 3.2).

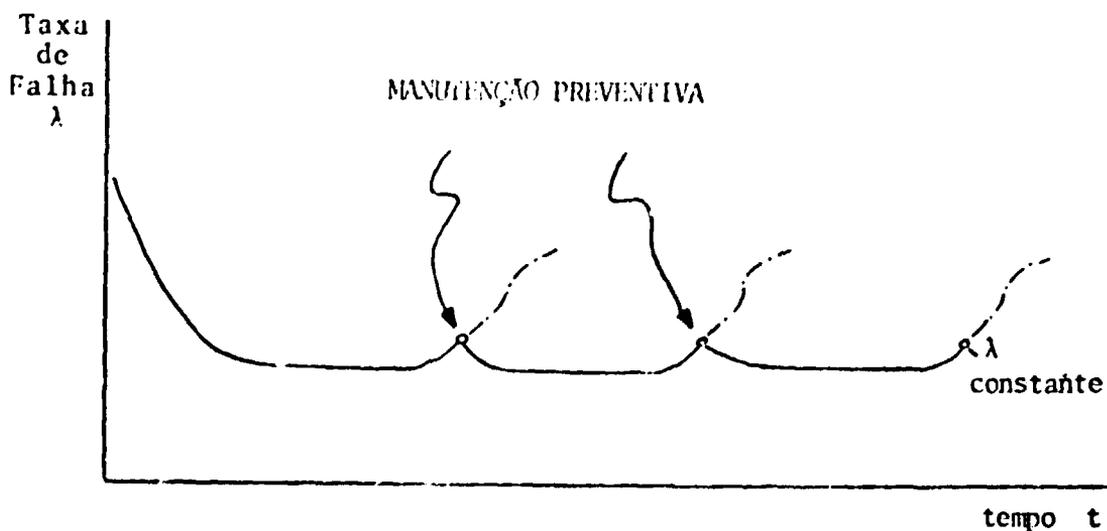


Figura 3.2 – Efeito da Manutenção Sobre a Taxa de Falhas de um Componente

Dessa forma, o comportamento de um componente do sistema pode ser mostrado na Figura 3.3.

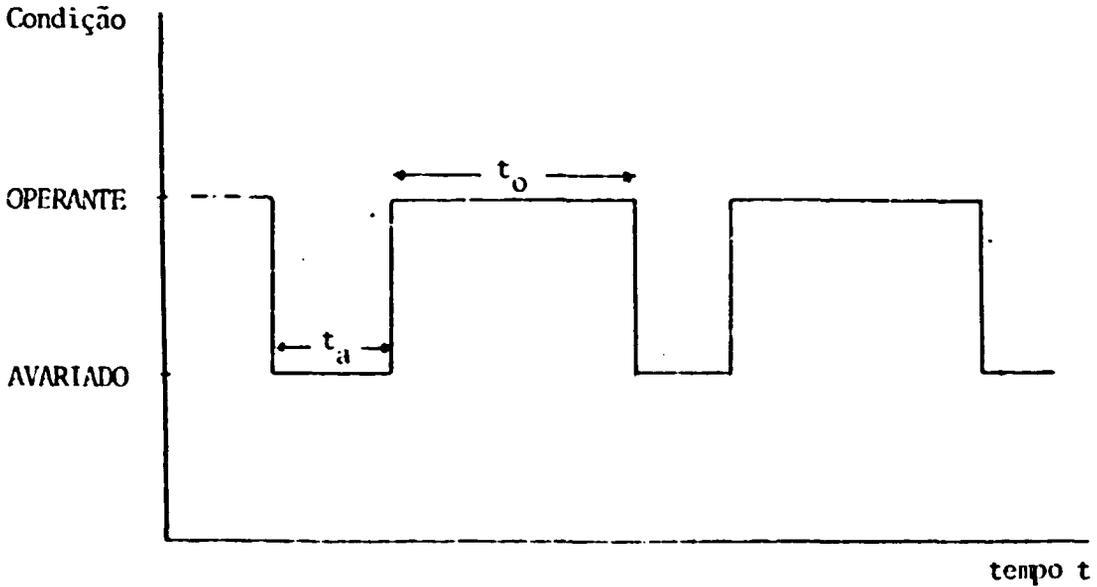


Figura 3.3 - Comportamento do Componente

onde:

t_o - tempo em que o componente está na condição operante

t_d - tempo em que o componente está na condição avariado.

O valor esperado de t_o , uma vez dada a sua função densidade de falha é obtido por:

$$\begin{aligned} \bar{t}_o &= \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad \text{dado que } \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \\ &= \int_0^{\infty} \lambda t \exp(-\lambda t) dt \\ &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \tag{3.2}$$

= TMPF (tempo médio para falha).

Analogamente, supondo uma forma exponencial para funções de densidade de reparo:

$$f_r = \mu \exp(-\mu t)$$

onde μ é a taxa de reparo, tem-se para o valor esperado de t_d :

$$\begin{aligned}
 \bar{t}_a &= \int_0^{\infty} t f_r(t) dt \\
 &= \int_0^{\infty} \mu t \exp(-\mu t) dt = \frac{1}{\mu} \\
 &= \text{TMR (tempo médio de reparo)}.
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

3.1.2 – Comportamento de Sistemas

Processos de Markov são caracterizados pela probabilidade de falha ser constante no tempo. Assim, o comportamento de cada componente admitido no sistema pode ser descrito pelos processos de Markov, discretos no espaço.

3.1.2.a – Processos em Tempos Contínuos

Considere-se um componente reparável, de taxa de falha λ , e taxa de reparo μ . Define-se por:

E_0 o estado de funcionamento no qual o componente está operante;

E_1 e estado de funcionamento no qual o componente está avariado;

$P_0(t)$ = probabilidade do componente se encontrar no estado E_0 no tempo t ;

$P_1(t)$ = probabilidade do componente estar no estado E_1 no tempo t .

Considerando-se dt um incremento de tempo, e supondo desprezível a probabilidade de ocorrer dois ou mais eventos neste intervalo de tempo, tem-se:

$$P_0(t + dt) = P_0(t) (1 - \lambda dt) + P_1(t) \mu dt$$

$$P_1(t + dt) = P_1(t) (1 - \mu dt) + P_0(t) \lambda dt$$

Separando os termos e dividindo por dt , obtém-se:

$$\frac{P_0(t + dt) - P_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{P_1(t + dt) - P_1(t)}{dt} = -\mu P_1(t) + \lambda P_0(t)$$

Para $dt \rightarrow 0$, tem-se:

$$\frac{P_0(t + dt) - P_0(t)}{dt} = \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{P_1(t+dt) - P_1(t)}{dt} = \frac{dP_1(t)}{dt} = P_1'(t)$$

Em representação matricial:

$$[P_0'(t) \ P_1'(t)] = [P_0(t) \ P_1(t)] \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix}$$

Uma vez definidas as condições iniciais, isto é, o estado de partida, as soluções do sistema matemático determinam a probabilidade do componente (ou do sistema) estar ou não operante com a evolução do tempo t .

Para $t \rightarrow \infty$, as probabilidades dos estados aproximam-se de um conjunto de valores fixos P_0 e P_1 ($P_0(\infty)$ e $P_1(\infty)$). Chamar-se-á estes valores de probabilidade estacionária dos estados.

Resolvendo o sistema acima, obtém-se:

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

Estes valores independem do estado inicial, e também podem ser obtidos fazendo $P_0'(t)$ e $P_1'(t)$ iguais a zero pelas soluções do sistema linear resultante:

$$[0 \ 0] = [P_0 \ P_1] \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix}$$

$$\text{Se } m = \text{tempo médio para falha (TMPF)} = \frac{1}{\lambda}$$

$$r = \text{tempo médio de reparos (TMR)} = \frac{1}{\mu} \text{ e designando } T \text{ como um ciclo médio (TMEF) ou}$$

$$T = m + r$$

Podem-se obter a expressão que nos dá a frequência de falhas do sistema:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{m+r} \\ = \frac{\mu\lambda}{\lambda + \mu}$$

como $P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$ e $P = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}$

Vem: $f = P_0 \cdot \lambda$ ou $f = P_1 \cdot \mu$ (3.4)

Estendendo-se a análise acima para um sistema mais complexo, a frequência do sistema se encontra num determinado estado ao longo do tempo, pode ser obtida por:

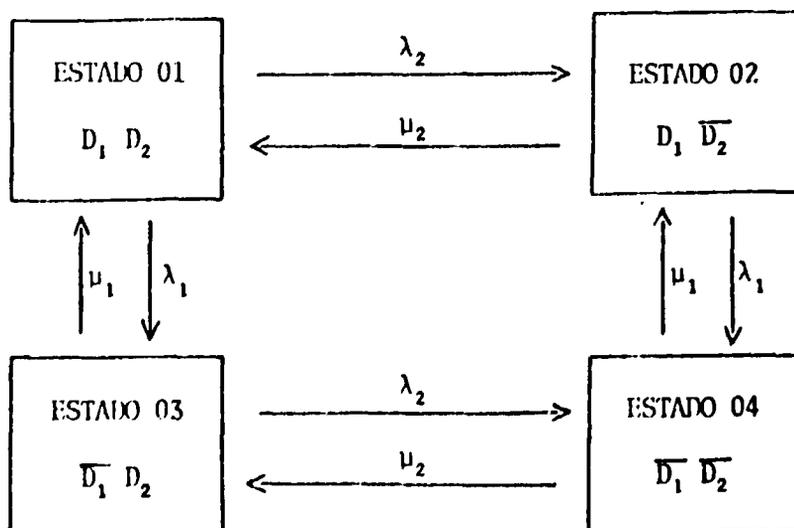
$$f_i = P_i \cdot \nu_i$$

= (probabilidade estacionária do estado i) x (taxa de saída do estado i). Assim um sistema mais complexo, composto de vários componentes pode adquirir várias combinações, e a cada uma dessas combinações representa um estado no qual, em princípio, o sistema pode se encontrar.

Chama-se de ESPAÇO DOS ESTADOS DO SISTEMA ao conjunto dos espaços formados pelas combinações possíveis.

Chama-se de DIAGRAMA DO ESPAÇO DOS ESTADOS aquele que descreve e representa para cada um dos estados o seu respectivo nó e a cada uma das possíveis transições entre dois estados por uma linha de conexão.

Por exemplo, consideremos um sistema composto de dois sistemas diesel D_1 e D_2 , cujo diagrama do espaço dos estados do sistema é mostrado na Figura 3.4.



onde: D indica diesel em operação
 \bar{D} indica diesel em reparo

Chamar-se-á de ESTADO DE INTERESSE ao estado do qual interessa saber a frequência ou a probabilidade de ocorrer tal evento (estado). No exemplo acima, o evento de ocorrer a perda dos dois diesel (estado 04), provavelmente é o estado de maior interesse.

3.1.2.5 Processos em Tempos Discretos

Um procedimento alternativo para uma mesma finalidade na análise do sistema é admitir que os processos se efetuem em intervalos de tempos discretos. Dessa maneira, as soluções são facilmente obtidas através de multiplicações de matrizes.

Define-se M, a matriz de probabilidade de transição, onde: $m(i,j)$ = probabilidade condicional do sistema estar no i-ésimo estado sofrer uma transição do i-ésimo estado para j-ésimo estado durante o intervalo de tempo discreto. Naturalmente para $i=j$, o elemento $M(i,i)$ indica a probabilidade do sistema permanecer no mesmo estado durante o intervalo de tempo. Assim, a probabilidade de transição depende só do estado presente.

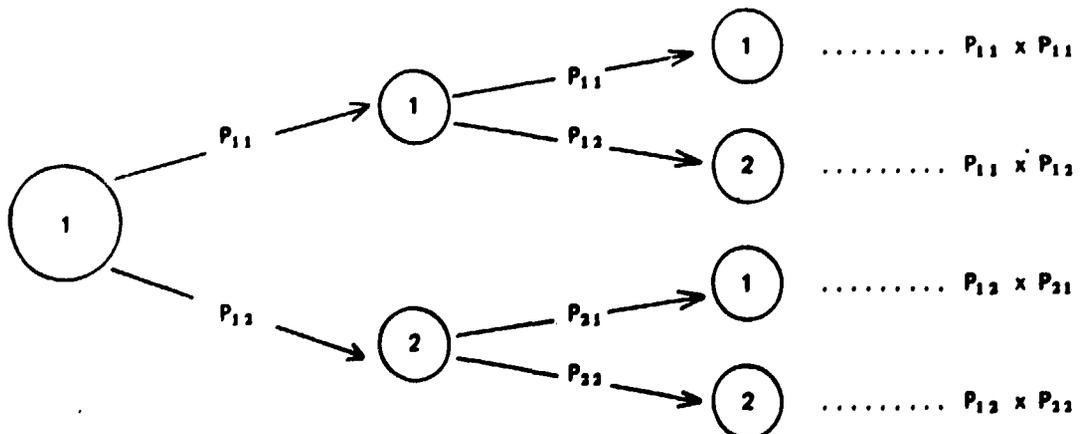
Multiplicando-se a matriz M, n vezes, pode-se observar que o elemento $M^n(i,j)$ representa a probabilidade do sistema se encontrar no j-ésimo estado, após n intervalos de tempo considerado, uma vez que se iniciou do i-ésimo estado.

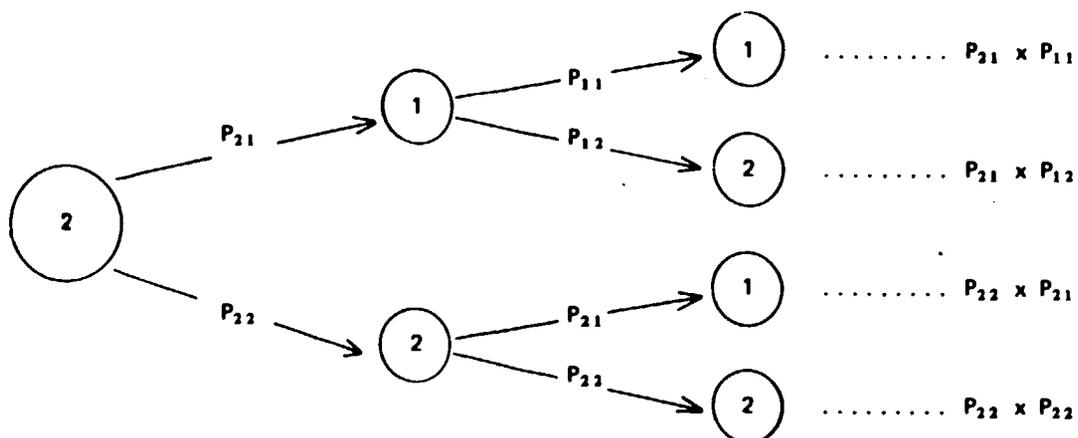
Isto pode ser facilmente visualizado para uma matriz composta de dois estados, após 2 intervalos de tempo discreto:

$$M = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}$$

$$M^2 = \begin{bmatrix} (P_{11} \cdot P_{11} + P_{12} \cdot P_{21}) & (P_{11} \cdot P_{12} + P_{12} \cdot P_{22}) \\ (P_{21} \cdot P_{11} + P_{22} \cdot P_{21}) & (P_{21} \cdot P_{12} + P_{22} \cdot P_{22}) \end{bmatrix}$$

Em termos de árvore de evento:





Generalizando:

$$[P_i(t = n)] = [P_i(t = 0)] [M]^n$$

onde:

$$[P_i(t = 0)] = [P_i(0)] = [P_1(0), P_2(0), \dots]$$

é o vetor que define o estado inicial.

$$[P_i(t = n)]$$

é o vetor, cujo i -ésimo elemento indica a probabilidade do sistema se encontrar no i -ésimo estado uma vez dada a condição inicial.

As probabilidades das transições são obtidas a partir das taxas de saídas dos seus respectivos estados:

$$M(i, j) \begin{cases} i \neq j \rightarrow (\text{taxa de transição do } i\text{-ésimo estado} \\ \text{para } j\text{-ésimo estado}) & \times \Delta t \\ i = j \rightarrow [1 - (\text{taxa total das transições de} \\ \text{saída do } i\text{-ésimo estado})] & \times \Delta t \end{cases}$$

onde:

- o intervalo de tempo Δt deve ser escolhido de tal maneira que os $M(i, j)$ nunca excedam o valor unitário;
- o intervalo de tempo Δt deve ser consideravelmente menor que o menor tempo requerido para reparo dos componentes.

Da mesma forma que ocorre quando o tempo é considerado contínuo, as probabilidades dos estados com a evolução do tempo também se aproximam a um conjunto de valores fixos, isto é, as probabilidades estacionárias dos estados.

3.1.2.c – Estados Absorventes

O procedimento feito até aqui tem a finalidade de obter resultados referentes à frequência de falhas do sistema. Um outro importante parâmetro útil na análise de confiabilidade do sistema, é a evolução da probabilidade da ocorrência de um estado de interesse com o tempo.

Para isso considera-se o estado de interesse como um estado absorvedor, isto é, uma vez que o sistema se encontra no tal estado, lá o sistema permanecerá.

Como será visto posteriormente, este procedimento será útil, fornecendo o tempo permissível do sistema de suprimento operar em um estado degradado, sem que alcance um determinado risco padrão (aceitável). Isto constitui informação útil a um planejamento de regras de operação de uma central nuclear, ou seja, conhecer o tempo permissível de operação de um reator no caso de uma das fontes externas ou um sistema diesel não estar disponível, sem que atinja um risco pré-determinado⁽¹⁰⁾.

Levando em consideração os estados absorventes, a matriz de transição $M(i,j)$ sofrerá algumas alterações.

Admitindo o k -ésimo estado, um estado absorvedor, então:

$$M(k,i) = 0, \quad \forall i \neq k$$

e

$$M(k,k) = 1$$

Observa-se que para $t \rightarrow \infty$, as probabilidades dos estados não absorventes tendem a zero, e a probabilidade dos estados absorventes aproximam a um conjunto de valores fixos. No caso de existir somente um único estado k absorvente, tem-se

$$P_k(\infty) = 1$$

3.2 – Terminologia

No estudo de confiabilidade, a terminologia deve ser bem definida para que a consistência da análise seja mantida. A terminologia descrita abaixo foi elaborada a partir de consultas a diversas referências^(19,29), visando a análise do problema em questão.

COMPONENTE

É qualquer dispositivo ou equipamento que possa ser considerado individualmente e que tenha uma função bem definida dentro de um sistema.

SISTEMA

É um grupo de componentes conectados ou associados em uma configuração fixa para desempenhar uma ou mais funções específicas.

CONFIABILIDADE

É a habilidade de um componente ou um sistema desempenhar uma função exigida, durante um determinado tempo e sob condições estabelecidas expressa pela probabilidade ou por outros parâmetros que indicam quantitativamente o seu desempenho.

DISPONIBILIDADE

É a probabilidade de um componente ou de um sistema de desempenhar satisfatoriamente uma determinada função específica.

FALHA

É o término da habilidade de um componente ou de um sistema desempenhar sua função específica.

Taxa de Falha

É o número esperado de falhas de um componente ou de um sistema durante um determinado tempo, quando o componente é restaurado imediatamente após a falha.

Tempo Médio entre Falhas (TMEF)

É a média aritmética dos tempos entre duas falhas consecutivas de um componente ou de um sistema.

Tempo Médio para Falha (TMPF)

É a média aritmética dos tempos em operação contínua de um componente ou de um sistema.

Frequência de Falha

É o número esperado de falhas de um componente ou de um sistema durante um determinado intervalo de tempo, levando em conta o tempo de reparo. Note-se que a frequência de falha assume o valor inverso do TMEF; a taxa de falha assume o valor inverso do TMPF.

INOPERÂNCIA

A inoperância descreve o estado do componente quando ele não está executando sua função específica, por algum evento diretamente associado com aquele componente (não necessariamente por falhas).

REPARO

É todo serviço efetuado em componentes avariados, com a finalidade de restabelece-los às condições normais.

Taxa de Reparo

É o número esperado de reparos de um componente durante um determinado intervalo de tempo quando o componente é avariado imediatamente após o reparo.

Tempo Médio de Reparos (TMR)

É a média aritmética dos tempos requeridos para completar uma atividade de reparo. Note-se que a taxa de reparo assume o valor inverso de TMR.

OBSERVAÇÕES

- As definições acima consideram os componentes como reparáveis.
- O conceito de inoperância está intimamente ligado a idéia do componente não estar disponível para operação, sendo que esta indisponibilidade pode ser causada por uma falha do equipamento, instalação ou por uma outra causa qualquer que não seja falha. A inoperância influi na confiabilidade do sistema como um todo, pois está diretamente ligada a interrupção de suprimento, visto que pode causar uma interrupção dependendo da configuração do sistema. Note-se que, toda inoperância não é obrigatoriamente provocada por uma falha, mas toda falha acarreta a inoperância do componente.

Note-se que:

- a taxa de falha de um componente é uma característica exclusiva do componente;
- a frequência de falha de um componente é uma característica do componente acoplado a instalação (depende do tempo de reparo).

4 – O MODELO TEÓRICO

4.1 – Descrição Sucinta do Modelo

Neste capítulo descreve-se o modelo teórico utilizado para o cálculo de confiabilidade do sistema de suprimento de energia elétrica para a usina de Angra I, em termos de alguns parâmetros de confiabilidade, tais como a frequência de falha, e a duração média das falhas. Em adição, uma análise complementar fornece o aumento da probabilidade de ocorrer a falha no suprimento com o decorrer do tempo, permitindo assim, avaliar o tempo admissível para a usina continuar em operação, quando uma ou mais fontes estiverem indisponíveis, sem exceder um determinado limite de segurança.

Este modelo teórico é essencialmente constituído de duas etapas:

A primeira etapa consiste em avaliar os parâmetros de confiabilidade de cada componente que contribui com o suprimento de energia, para depois utilizá-los como dados de entrada numa segunda

etapa do modelo conforme esquematizado na Figura 4.1. Para se obter os parâmetros de confiabilidade na alimentação dos barramentos de segurança (1A3 e 1A4) de cada fonte, é necessário considerar todos os equipamentos e componentes inseridos entre as fontes, e os barramentos pertinentes ao sistema de distribuição interna da usina.

A segunda etapa é proposto um método probabilístico baseado em processos Markovianos em que, utilizando-se dos parâmetros λ e μ de cada fonte dos barramentos de segurança obtidos na etapa anterior, pode-se avaliar a confiabilidade do sistema de suprimento sob dois diferentes aspectos: um, em termos de frequência de falha e sua duração média, e o outro, em termos de probabilidade de falha do sistema com o decorrer do tempo sob várias circunstâncias. A descrição do modelo será tratada na seção a seguir.

Também, é feita uma análise de sensibilidade, mostrando a influência da confiabilidade de cada componente sobre os resultados finais.

4.2 – Procedimento de Cálculo

O sistema de suprimento de energia elétrica para a central nuclear de Angra I, consiste de quatro fontes de energia:

- Sistema Santa Cruz, via 138 KV
- Sistema Furnas, via 500 KV
- Gerador da própria usina
- Dois geradores diesel, redundantes.

Cada uma dessas fontes contribui para o suprimento de energia elétrica para a usina conforme as regras estabelecidas no procedimento de operação descrito no Capítulo 2.

As fontes são reparáveis e são caracterizadas pelas taxas de falha e de reparo λ e μ , respectivamente e constantes no tempo. O modo de obtenção dos λ e μ de cada fonte será tratado pormenorizadamente na seção 4.3. Dessa maneira, o comportamento do sistema de suprimento pode ser descrito pelos processos Markovianos.

Cada fonte pode apresentar-se em vários estados de funcionamento:

- DISPONÍVEL EM CARGA: alimentando os barramentos de segurança. O estado é denotado pelo dígito '1'.
- DISPONÍVEL, PORÉM NÃO EM CARGA: não está alimentando os barramentos de segurança. O estado é denotado pelo dígito '2'.

OBS.: Para o diesel, este estado refere-se à condição "desligado".

- INDISPONÍVEL: suprimento interrompido quando é requisitado pela carga de segurança. O estado é denotado pelo dígito '0'.

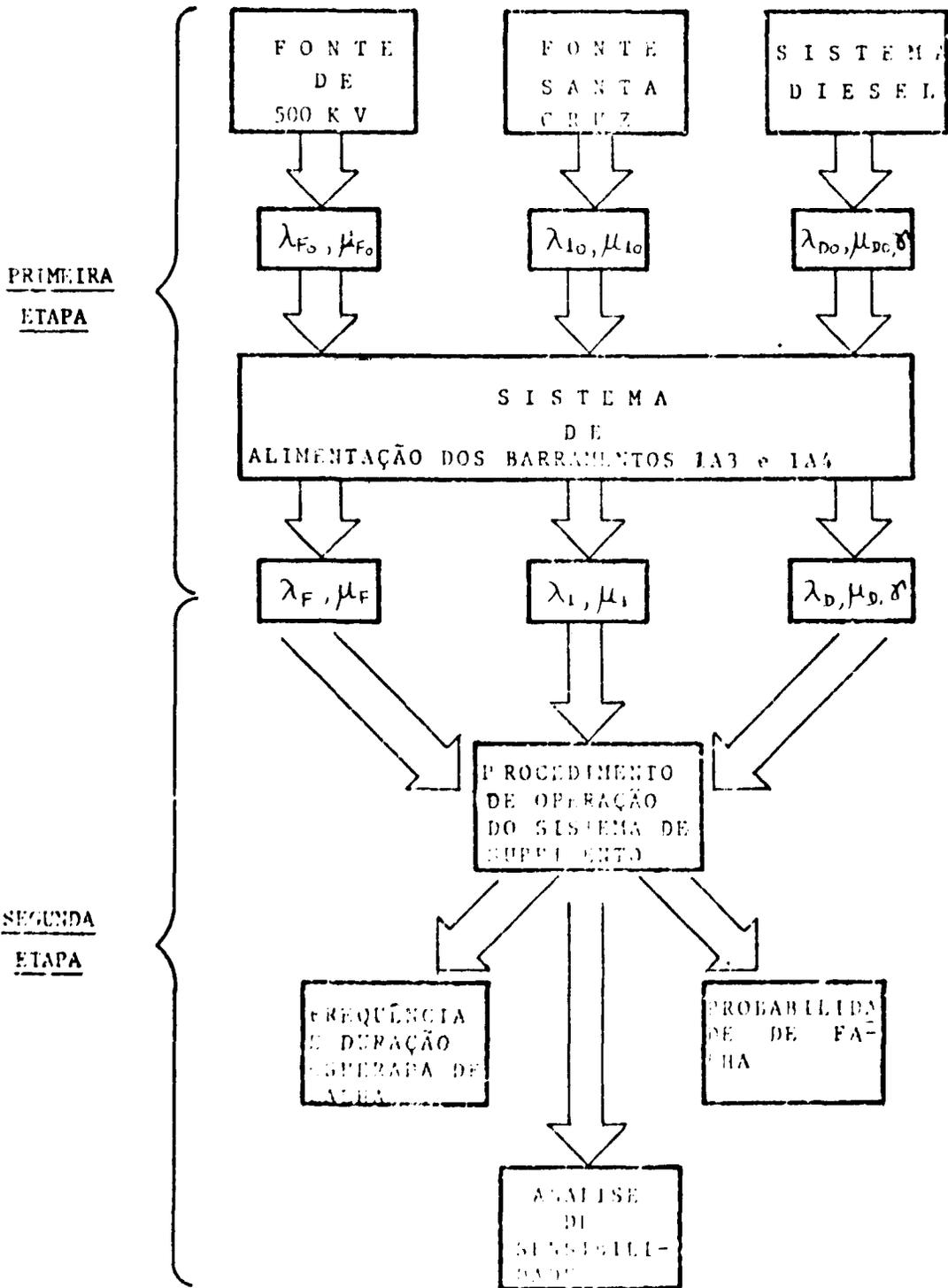


Figura 4.1 - Fluxograma da Análise

- **DISPONÍVEL, EM ESPERA:** um estado adicional ao sistema diesel: quando se requer que o motor diesel esteja em funcionamento, porém não em carga. Este estado é denotado pelo dígito '9'.

Assim é possível formar-se um elevado número de combinações de estados elementares; cada uma dessas combinações é definida como um estado do sistema.

Estados instáveis são aqueles estados que apresentam uma determinada configuração, porém, de permanência curta e controlada pelo operador.

Estados instáveis não influenciam a análise, pois os seus efeitos são desprezíveis.

O sistema pode encontrar-se em um dos estados possíveis listados abaixo:

12-2-22

01-0-99

01-0-09

01-0-00

10-0-99

10-0-09

10-0-00

12-0-00

12-0-09

12-0-99 → estado instável

00-0-99

00-0-09

00-0-00 → provavelmente o estado de maior interesse

onde:

- os dois primeiros dígitos definem os estados das duas fontes externas: sistema Santa Cruz e sistema Furnas respectivamente.
- o dígito central define o estado do gerador da própria usina.
- os dois últimos dígitos definem os estados dos dois sistemas diesel da usina.

A partir de um certo estado inicial, o sistema pode sofrer transições, de um estado para outro, os quais são causados por uma falha ou por um reparo de um dos componentes, caracterizados pelos seus parâmetros λ e μ , respectivamente. Dessa maneira, com o decorrer do tempo, o sistema exibe um comportamento dinâmico. Baseado no procedimento de operação e em algumas hipóteses, mencionadas a seguir, o sistema em análise pode ser representado pelo diagrama do espaço dos estados conforme mostra a Figura 4.2.

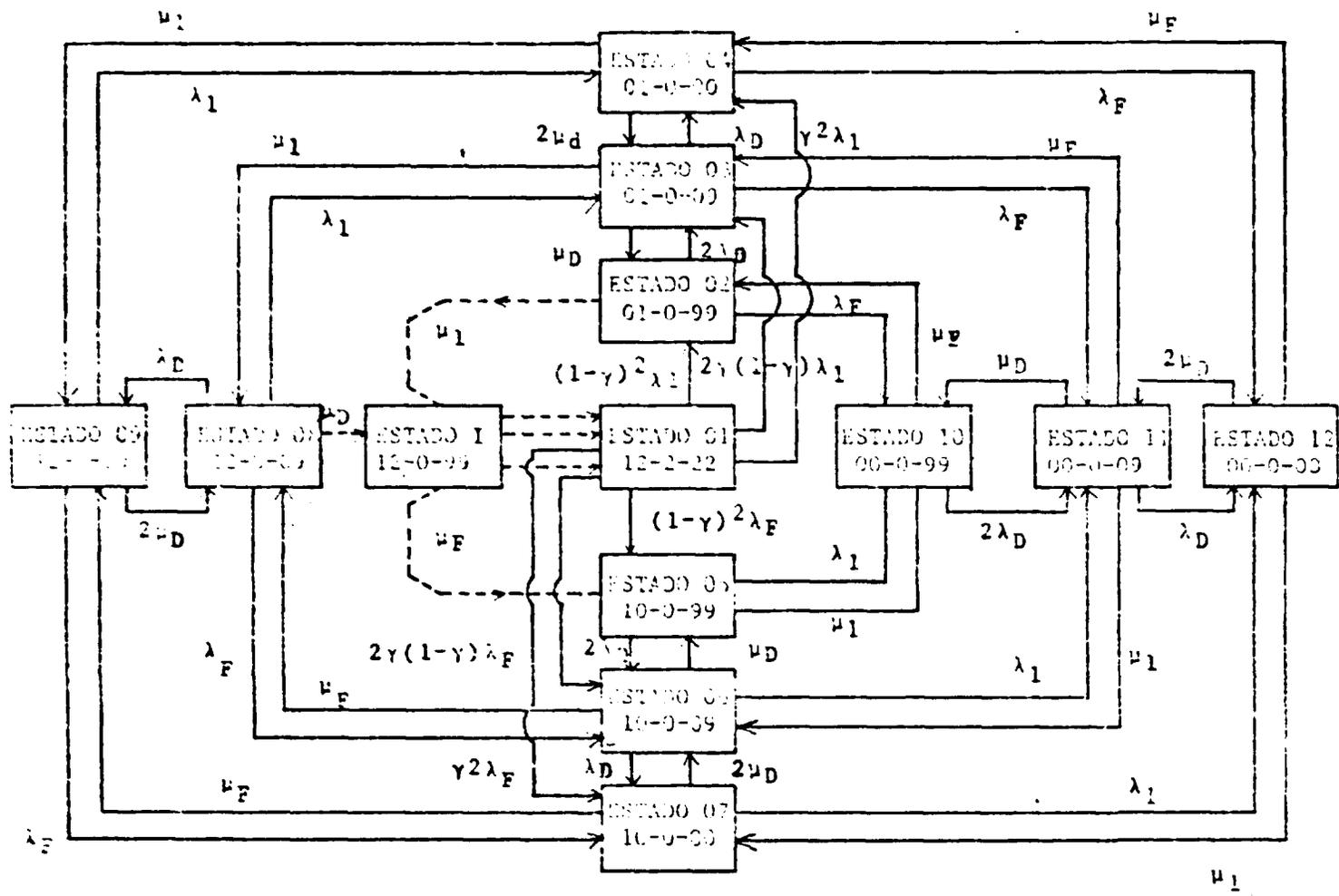


Figura 4.2 – Diagrama de Espaço dos Estados do Sistema

onde:

λ_1 – taxa de falha do sistema Santa Cruz, via 138 KV

λ_F – taxa de falha do sistema Furnas, via 500 KV

λ_D – taxa de falha do diesel em operação

μ_1 – taxa de reparo do sistema Santa Cruz, via 138 KV

μ_F – taxa de reparo do sistema Furnas, via 500 KV

μ_D – taxa de reparo do sistema diesel

γ – probabilidade de falha na partida de motor diesel.

O diagrama dos espaços é válido baseado nas seguintes hipóteses:

- 1) Despreza-se a probabilidade de ocorrer falhas ou reparos em mais que 1 componente, durante o intervalo de tempo discreto (1 hora).
- 2) Após a perda de suprimento de uma das fontes externas, os motores diesel são ligados.
- 3) Toda ação de reparo no sistema diesel é iniciada somente quando ocorre falha durante a sua partida.
- 4) Os valores das taxas de falha e de reparo são constantes (distribuição exponencial). Esta hipótese é aceitável, se os componentes forem revisados periodicamente conforme mencionado no Capítulo 3.
- 5) Todo serviço de reparo (mão-de-obra, peças para substituir) é executado sem ser afetado por qualquer outra atividade de reparo. Esta hipótese permite manter as taxas de reparo constantes e independentes das circunstâncias alheias.
- 6) O ensaio periódico do diesel revela somente as falhas sobrevividas durante o intervalo entre ensaios, sem garantir um sucesso absoluto de partida numa solicitação seguinte. Esta hipótese permite manter o valor da probabilidade de recusa de partida (γ) constante.
- 7) Despreza-se aqui as falhas por um modo comum das fontes internas e externas. Para isso é suposto que os valores das taxas de falha por modo comum são bastante inferiores àquelas consideradas, ($< 10^{-7}$).

A matriz de transição denotada por M , referente ao diagrama do espaço dos estados ilustrado anteriormente, é mostrada na Figura 4.3.

Para facilidade de cálculo, considerando-se que os processos sejam discretos no tempo, a equação do sistema pode ser colocada na forma:

$$[P_i(t=n)] = [P_i(t=0)] [M]^n$$

$1-(\lambda_1+\lambda_2)$	$(1-\gamma)^2\lambda_1$	$2\gamma(1-\gamma)\lambda_1$	$\gamma^2\lambda_1$	$(1-\gamma)^2\lambda_f$	$2\gamma(1-\gamma)\lambda_f$	$\gamma^2\lambda_f$	0	0	0	0	0
μ_1	$1-(\mu_1+\lambda_f+2\lambda_D)$	$2\lambda_D$	0	0	0	0	0	0	λ_f	0	0
0	μ_D	$1-(\mu_1+\lambda_f+\lambda_D+\mu_D)$	λ_D	0	0	0	μ_1	0	0	λ_f	0
0	0	$2\mu_D$	$1-(\mu_1+\lambda_f+2\mu_D)$	0	0	0	0	μ_1	0	0	λ_f
μ_f	0	0	0	$1-(\lambda_1+\mu_f+2\lambda_D)$	$2\lambda_D$	0	0	0	λ_1	0	0
0	0	0	0	μ_D	$1-(\lambda_1+\mu_f+\lambda_D+\mu_D)$	λ_D	μ_f	0	0	λ_1	0
0	0	0	0	0	$2\mu_D$	$1-(\lambda_1+\mu_f+2\mu_D)$	0	μ_f	0	0	λ_1
μ_D	0	λ_1	0	0	λ_f	0	$1-(\lambda_1+\lambda_f+\lambda_D+\mu_D)$	λ	0	0	0
0	0	0	λ_1	0	0	λ_f	$2\mu_D$	$1-(\lambda_1+\lambda_f+2\mu_D)$	0	0	0
0	λ_f	0	0	μ_1	0	0	0	0	$1-(\mu_1+\mu_f+2\lambda_D)$	$2\lambda_D$	0
0	0	μ_f	0	0	μ_1	0	0	0	μ_D	$1-(\mu_1+\mu_f+\mu_D+\lambda_D)$	λ_D
0	0	0	μ_f	0	0	μ_1	0	0	0	$2\mu_D$	$1-(\mu_1+\mu_f+2\mu_D)$

Figure 4.3 - Matriz de Transição

- onde:
- n = indica o número de tempos discretos decorridos
 - $[M]^n$ = matriz de transição M elevada a 'n'
 - $[P_i(t = 0)]$ = vetor de probabilidades iniciais dos estados (condição inicial)
 - $[P_i(t = n)]$ = vetor de probabilidades dos estados no tempo n

4.2.1 – Cálculo de Frequência de Falhas

Para determinar a frequência de falha do sistema de suprimento, inicialmente, deve-se obter os valores das probabilidades estacionários dos estados, isto é, os $P_i(\infty)$.

Conforme visto no Capítulo 3, a frequência do i -ésimo estado é dada por:

$$f_i = P_i \times (\Sigma \text{taxas de saída do estado } i)$$

É evidente que o estado de maior interesse corresponde ao evento de ocorrer uma perda completa de todas as fontes de suprimento, representado no diagrama de espaço pelo estado 12. Portanto:

$$f_{12} = P_{12} \times (\mu_1 + \mu_F + 2\mu_D)$$

4.2.2 – Cálculo da Duração Esperada

Sabendo-se que o tempo médio de reparo é dado por:

$$\text{TMR} = \frac{1}{\text{taxa de reparo}}$$

Pode ser observado que a taxa de reparo do estado em análise é a soma das taxas de saída do estado. Então da equação acima e da equação 3.4, vem:

$$\text{TMR} = \frac{1}{\Sigma \mu_i} = \frac{P_i}{f_i}$$

onde:

P_i = estado de interesse

TMR = tempo médio de permanência no estado de interesse (tempo médio de reparo)

f_i = frequência de ocorrer o evento correspondente ao estado de interesse i .

4.2.3 – Cálculo das Probabilidades Transitórias

As probabilidades transitórias permitem avaliar o período de tempo admissível ao reator estar em operação sob condições de indisponibilidade parcial das fontes de energia, (estados degradados), sem comprometer a sua segurança.

Conforme visto no Capítulo 3, o sistema matemático para o caso em que o estado de interesse é um estado absorvedor será:

$$[P_i(t=n)] = [P_i(t=0)] [M']^n$$

onde:

$[M']^n$ é a matriz de transição com estado absorvedor elevado a n.

$M'(k,k) = 1$, k-ésimo estado é um estado absorvedor

$M'(k,i) = 0, \forall i$

Um programa computacional em FORTRAN, acoplado a análise de sensibilidade, foi desenvolvido para executar o procedimento descrito anteriormente, cujos resultados estão mostrados no Capítulo 5.

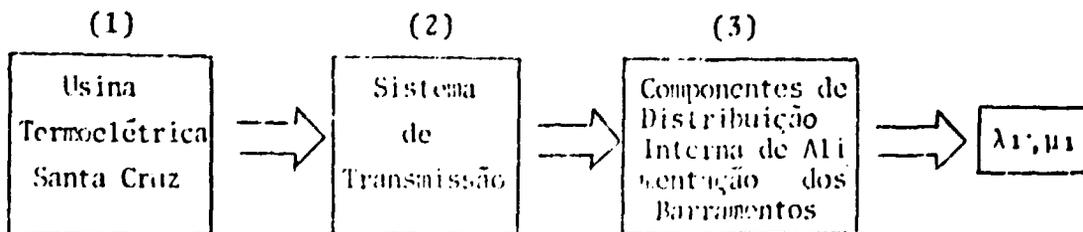
Na secção que se segue, é feita a análise para a determinação dos parâmetros de entrada do modelo teórico descrito.

4.3 – Determinação dos Parâmetros de Confiabilidade (λ_s e μ_s) das Fontes

4.3.1 – Sistema Santa Cruz Via 138 KV

Nesta secção está descrito o procedimento de cálculo dos parâmetros λ_1 e μ_1 (taxa de falha do suprimento via 138 KV e a sua duração média), que serão usados como dados de entrada no cálculo de confiabilidade do sistema de suprimento.

Por conveniência, divide-se o sistema em três fases:



Na fase (1), estima-se a taxa de frequências de interrupções na produção de energia elétrica da usina de Santa Cruz. O valor utilizado foi obtido de uma usina termoeletrica convencional típica⁽³⁴⁾.

Na fase (2), calcula-se o aumento de taxa de falhas λ_1 e μ_1 , causado por falhas do Sistema de Transmissão. O sistema de transmissão compreende: subestação elevadora, abaixadora e as linhas de transmissão aéreas.

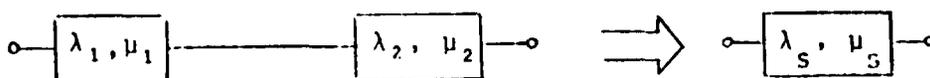
Na fase (3), calcula-se o aumento da taxa de falhas λ_1 e μ_1 , causado por falhas do sistema interno de distribuição elétrica aos barramentos 1A3 e 1A4. O sistema de distribuição compreende: transformador, disjuntores, chaves de conexão, barramentos etc.

O sistema simplificado é mostrado na Figura 4.4.

Supondo-se, que os componentes tenham um comportamento Markoviano, o cálculo dos parâmetros de confiabilidade de um sistema pode ser reduzido à composição de diversas unidades em série e em paralelo.

COMPONENTES EM SÉRIE

Sejam 2 componentes reparáveis, estatisticamente independentes, arranjados em série:



A disponibilidade do componente equivalente A_s é o produto das disponibilidades dos componentes 1 e 2.

$$A_s = A_1 \cdot A_2 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \quad (4.1)$$

A frequência de falha do componente equivalente é igual à soma dos dois eventos:

$$f_s = A_2 \cdot f_1 + A_1 \cdot f_2 = \frac{1}{T_s} = \frac{\lambda_s \cdot \mu_s}{\lambda_s + \mu_s} \quad (4.2)$$

$$= \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \left(\frac{\lambda_1 \mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \right) + \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left(\frac{\lambda_2 \mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \right) \quad (4.3)$$

$$\text{Como } A_s = \frac{\mu_s}{\lambda_s + \mu_s} \cdot \frac{\lambda_s}{\lambda_s} = \frac{f_s}{\lambda_s}$$

Substituindo as equações (4.1) e (4.3) vem

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2$$

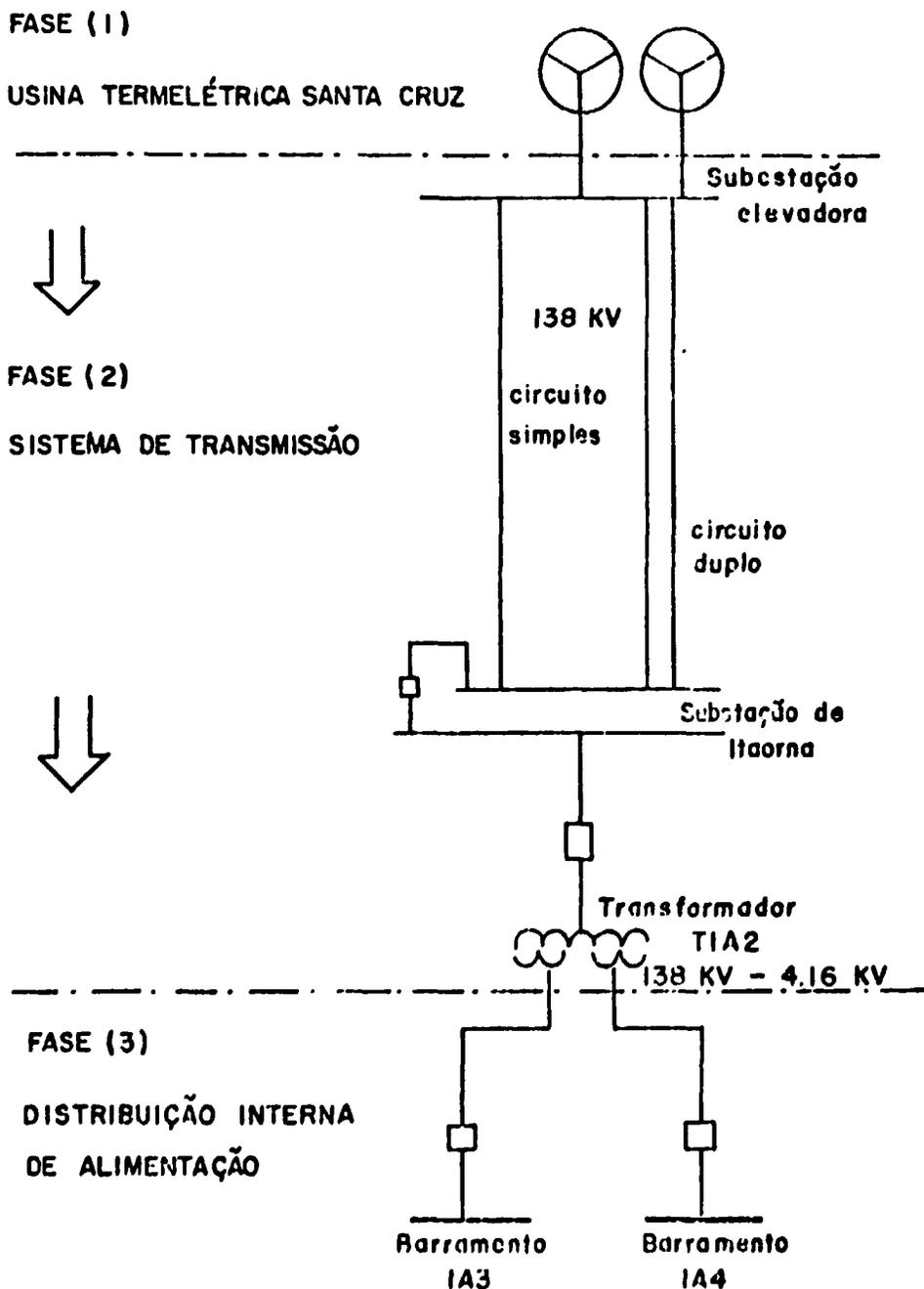


Figura 4.4 - Diagrama Esquemático do Sistema de Alimentação de Santa Cruz

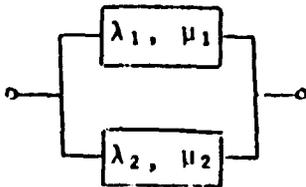
Similarmente, chega-se:

$$\mu_s = \frac{\lambda_s}{\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}}$$

COMPONENTES EM PARALELO

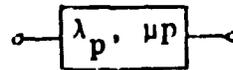
Sejam dois componentes reparáveis, estatisticamente independentes, arranjados em paralelo:

COMPONENTE 1



COMPONENTE 2

COMPONENTE EQUIVALENTE



A indisponibilidade do componente equivalente \bar{A}_p é o produto das indisponibilidades dos componentes 1 e 2.

$$\bar{A}_p = \bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \quad (4.4)$$

A frequência de falha do componente equivalente é igual à soma dos dois eventos:

$$f_p = f_1 \cdot A_2 + f_2 \cdot A_1 = \frac{1}{T_p} = \frac{\lambda_p + \mu_p}{\lambda_p + \mu_p} \quad (4.5)$$

$$= \frac{\lambda_1 \mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \right) + \frac{\lambda_2 \mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \right) \quad (4.6)$$

$$\text{Como } \bar{A}_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_p + \mu_p} \frac{\mu_p}{\mu_p} + \frac{f_p}{\mu_p} \quad (4.7)$$

Substituindo (4.4) e (4.5), obtém-se:

$$\mu_p = \mu_1 + \mu_2$$

Similarmente

Como $\bar{A}_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_p + \mu_p}$ e das Equações 4.7 e 4.6 vem

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_p + \mu_p} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1) (\lambda_2 + \mu_2)}$$

e portanto

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\mu_1 + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \lambda_2}$$

CÁLCULO DA FASE (1) – USINA TERMOELÉTRICA DE SANTA CRUZ

A usina consiste de quatro geradores com turbina de vapor, dois de 218 MWe e dois de 82 MWe e quatro conjuntos de turbinas de gás de 11 MWe, totalizando uma potência de 644 MWe.

A Tabela 4.1⁽³⁴⁾ mostra os valores típicos de confiabilidade de usinas geradoras de eletricidade, nuclear e convencional.

Tabela IV.1

Disponibilidade de Usinas Geradoras

Tipo de Geração	Idade (anos)	U, Indisponibilidade	falhas/ano λ	horas μ	Duração de Manutenções Planejadas semanas / ano
NUCLEAR:					
1000 MW	> 5	0.10	6.4	152	7
	4-5	0.15	8.2	190	7
	2-4	0.27	11.1	292	7
	< 1	0.30	16.5	228	7
TÉRMICA:					
600 MW	> 3	0.18	16.1	119	7
300 MW	> 3	0.13	12.1	108	6
TURBOGÁS:	> 1	0.05	8	230	2
HIDRO:	> 1	0.02	2	90	2

onde:

U – indisponibilidade da usina (razão entre o tempo fora de operação e o tempo total de exposição)

λ – taxa de falha

r – tempo médio de restauração (reparo)

Para efeito de cálculo, tomou-se os seguintes valores para os parâmetros λ_1 e r_1 , para a usina termoeétrica de Santa Cruz:

$$\lambda_1 = 2,74 \text{ falhas / ano}$$

$$r_1 = 55 \text{ h}$$

CÁLCULO DA FASE (2) – SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Duas linhas de transmissão de 138 KV (1 circuito simples L1, e 1 circuito duplo (2) partem da Usina de Santa Cruz, percorrendo uma distância de aproximadamente 80 km até ser conectada à subestação de Itaorna. Esta subestação, além de outras cargas, alimenta o transformador abaixador T1A2 da Usina Nuclear de Angra I para, posteriormente, ser distribuído para as cargas internas da usina. O diagrama lógico correspondente às linhas de 138 KV equivale a um arranjo em paralelo das duas linhas de transmissão.

A taxa de falha e a duração média do componente equivalente às duas linhas é calculado a seguir, e os dados de falha das linhas utilizados no cálculo⁽¹²⁾ é mostrado na Tabela IV.3.

$$\lambda_{L1} = \lambda_{L.} \times 0,8 = 1,5 \times 0,8 = 1,2 \text{ falhas / ano}$$

$$\lambda_{L2} = \lambda_{L..} \times 0,8 = 0,8 \times 0,8 = 0,64 \text{ falhas / ano}$$

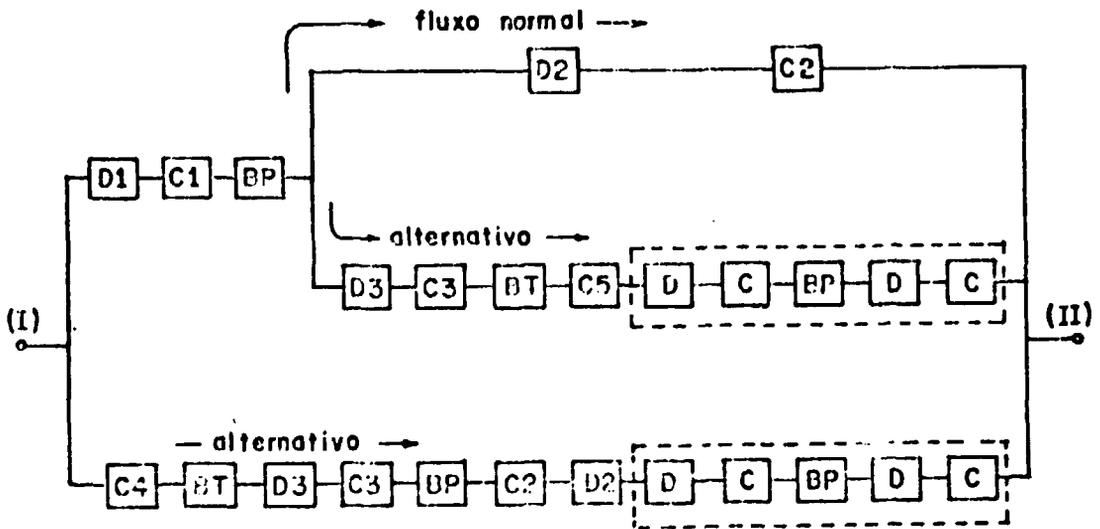
onde: $\lambda_{L.}$ = taxa de falha de um circuito simples de 138 KV por 100 Km.

$\lambda_{L..}$ = taxa de falha de um circuito duplo de 138 KV por 100 Km.

$$\text{Portanto: } \lambda_{11'} = \frac{\lambda_{L1} \cdot \lambda_{L2} (\mu_{L1} + \mu_{L2})}{\mu_{L1} \mu_{L2} + \mu_{L2} \lambda_{L1} + \mu_{L1} \lambda_{L2}} = 0,00175 \text{ falhas / ano}$$

$$\mu_{11'} = \mu_{L1} + \mu_{L2} = 1752 \text{ reparos / ano}$$

O diagrama unifilar da subestação de Itaorna é mostrado na Figura 2.2 e o diagrama lógico correspondente é mostrado a seguir:



Para este arranjo da subestação não é possível uma segunda transferência de carga ao barramento BT, isto é, não se pode efetuar a transferência de carga ao barramento de transferência, se ele já estiver energizado.

Procurando tornar o diagrama lógico compatível com esse fato, os componentes utilizados no funcionamento normal na alimentação de outras cargas são inseridos no diagrama (conjunto tracejado). Porém, este procedimento não corresponde totalmente à realidade, pois a falha de um componente tracejado após ter ocorrido transferência da carga de segurança ao barramento BT, não afeta essa transferência.

Os cálculos serão realizados baseando-se no diagrama lógico acima, o que acarretará na obtenção de resultados mais conservadores.

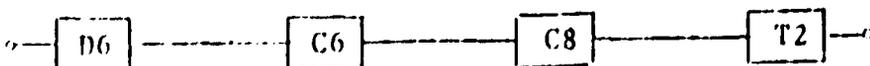
As taxas de falhas de equipamentos utilizados no cálculo estão mostrados na Tabela IV.3⁽³⁰⁾.

Portanto, tem-se:

$$\lambda_{\text{subestação Itaorna}} = \lambda_{11''} = 0.000006 \text{ falhas/ano}$$

$$\mu_{\text{subestação Itaorna}} = \mu_{11''} = 411 \text{ reparos/ano}$$

O diagrama lógico correspondente à parte do sistema que alimenta o transformador abaixador T1A2 é mostrado a seguir:



Utilizando-se os dados de falha da Tabela IV.3, tem-se:

$$\lambda_{11'''} = 0,029 \text{ falhas / ano}$$

$$\mu_{11'''} = 65 \text{ reparos / ano}$$

Tabela IV.3
Dados de Falhas

COMPONENTE	Taxa de Falha Média falhas / ano	Tempo de Reparo Médio (horas)
Chaves Seccionadores		
– Curto nos contatos λ	0.001	10
– Falha para operar	0.0003	
Disjuntores > 100 KV		
– Falha de Disjuntor λ	0.007	72
– Disjuntor preso	0.0005	
Disjuntores < 20 KV	0.004	27
Barramento	0.005	4
Transformador	0.02	170
Diesel		
– Falha durante operação	0.003/hora	65
– Falha de partida	0.03	
Linhas		
– Cabo subterrâneo	0.07/ano.km	34
– 138 KV		
– circuito simples	1.5/ano 100 km	10
– circuito duplo	0.8/ano 100 km	10
– 500 KV	0.4–1.5/ano 100 km	5h–20h
– 345 KV	0.6–1.6/ano 100 km	5h–20h

Desta maneira, o componente equivalente ao sistema de transmissão é:

$$\lambda_{11} = \lambda_{S. \text{transmissão}} = \lambda_{11'} + \lambda_{11''} + \lambda_{11'''} = 0.0308 \text{ falhas / ano}$$

$$\mu_{11} = \mu_{S. \text{transmissão}} = \frac{\lambda_{S. \text{transmissão}}}{\frac{\lambda_{11'}}{\mu_{11'}} + \frac{\lambda_{11''}}{\mu_{11''}} + \frac{\lambda_{11'''}}{\mu_{11'''}}} = 68 \text{ reparos / ano}$$

CÁLCULO DA FASE (3) – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Após transformar o nível de tensão de 138 KV para 4.16 KV, o sistema dispõe de dois barramentos de segurança redundantes denotados por 1A3 e 1A4. Cada um é capaz de suprir a carga total dos dispositivos de segurança exigidos durante uma condição de emergência.

O diagrama lógico correspondente é o seguinte:



onde:

D7 refere-se ao disjuntor T1A2-3 ou T1A2-4

BA refere-se ao barramento 1A3 ou 1A4

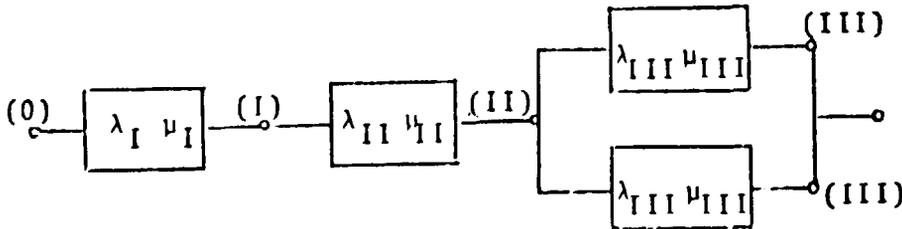
Utilizando-se os dados de falha da Tabela IV.3, tem-se:

$$\lambda_{III} = 0,009 \text{ falhas / ano}$$

$$\mu_{III} = 616 \text{ reparos / ano}$$

DIAGRAMA LÓGICO RESULTANTE DO SISTEMA DE SANTA CRUZ

Agrupando-se as três fases, num único diagrama lógico, obtém-se os parâmetros λ_1 e μ_1 do suprimento de energia elétrica para os barramentos 1A3 ou 1A4:



$$\lambda = 2,78 \text{ falhas / ano}$$

$$\mu = 156,6 \text{ reparos / ano}$$

4.3.2 – Determinação dos Parâmetros de Confiabilidade do Sistema Furnas

4.3.2.1 – Conceitos Genéricos do Método

O método utilizado avalia a confiabilidade do suprimento a pontos de carga na rede levando em conta interrupções forçadas do sistema de transmissão. Em termos de frequência de interrupção de suprimento da rede externa para a central nuclear e a sua duração esperada.

O método apresentado⁽¹⁶⁾ baseia-se em processos estocásticos, no caso específico, conhecidos como processos de Markov; assume-se que os elementos são reparáveis, independentes e com tempo de reparo e de operação distribuídos exponencialmente.

Normalmente as redes de sistemas de transmissão envolvem inúmeros dispositivos e equipamentos, de modo que a análise minuciosa de confiabilidade torna-se bastante complexa. Neste trabalho, considera-se, simplificadamente, o sistema de transmissão constituído a nível de elementos de subestação, linhas de transmissão e unidades geradoras de energia elétrica.

Os elementos podem estar interconectados em qualquer configuração, não havendo necessidade de distinguir as conexões em séries ou em paralelos.

Adotou-se as seguintes convenções:

- a) as subestações são representadas por círculos e denotadas por **nós**;
- b) as linhas de transmissão são representadas por segmentos e denotadas por **componente**;
- c) as usinas são representadas por quadrados e denotadas todas elas unidas num único **ponto de referência**.

Cada elemento pode estar em duas diferentes condições de operação:

- Operante: quando o elemento executa devidamente sua função;
- Inoperante: quando o elemento não executa devidamente a sua função.

Inoperância de um elemento pode ser causada por sua própria falha, ou por falhas de certos elementos alheios, e denota-se por condição "down", a inoperância causada pela própria falha do elemento.

4.3.2.1.a – Probabilidade das Condições (Operante ou Inoperante)

Seja I um elemento do sistema e λ_i a sua taxa de falha.

Então $m_i = \frac{1}{\lambda_i}$ e μ_i a sua taxa de reparo

Então: $r_i = \frac{1}{\mu_i}$

Tem-se que $P_{oi} = \frac{m_i}{m_i + r_i} = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i}$ Probabilidade de encontrar o i -ésimo elemento em condição de operação.

$P_{di} = \frac{r_i}{r_i + m_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}$ idem, em condição "down"

Seja um sistema composto de N elementos. O número de combinações possíveis, que constituem o espaço amostral de estados elementares, é 2^N , e cada uma dessas combinações é chamada de estado elementar do sistema. Se N é grande, o número de estados resultantes é muito grande, o que torna o tempo de computação dispendioso.

Para remediar, introduz-se o conceito de "estados compostos", que aproveita a peculiaridade do sistema através da configuração das suas interconexões.

4.3.2.1.b – Estados Compostos

Define-se um estado elementar do sistema especificando as condições de todos os elementos que compõem a rede. Um estado composto é definido quando é especificado a condição de um número menor de elementos. Em outras palavras, em determinados estados elementares, é dispensável especificar condições de certos elementos por já estarem sem suprimento mesmo que estejam em condições de operar, causado por falha de um elemento que interrompe a ligação com o ponto de referência. Assim, um estado composto inclui dois ou mais estados elementares.

As condições que definem o espaço amostral dos estados compostos são:

- 1) em cada estado composto deve estar especificado as condições de um número suficiente de elementos, de modo que seja possível saber as condições de cada elemento do sistema.
- 2) Os estados compostos devem ser mutuamente exclusivos, isto é, nenhum estado deve estar simultaneamente em dois ou mais estados compostos.
- 3) O conjunto de todos os estados compostos devem formar um espaço amostral COMPLETO, isto é, qualquer estado elementar deve estar contido em um dos estados compostos.

4.3.2.1.c – Eventos que Acarretam uma Interrupção

É considerado interrupção em um dado nó, quando:

- não existe nenhum caminho pelo sistema que liga o ponto de referência ao nó considerado através de elementos operantes.
- o próprio nó está em condição Down.

Assume-se que:

- A demanda de energia nunca excede a energia gerada,
- as condições de operação nunca ultrapassem as capacidades dos equipamentos.

4.3.2.1.d – Probabilidade de um Estado Composto

Seja i um estado composto, definido por:

- elementos $1, 2, \dots, j$ operantes
- elementos $j + 1, j + 2 \dots l$ down
- elementos $l + 1, l + 2 \dots n$ não especificados

A probabilidade do estado l é dado por:

$$P_l = \prod_{i=1}^j P_{ui} \times \prod_{i=j+1}^l P_{di}$$

onde:

P_{ui} – é a disponibilidade do i -ésimo elemento

P_{di} – é a indisponibilidade do i -ésimo elemento

$$P_{di} = 1 - P_{ui}$$

4.3.2.1.e – A Frequência de uma Transição

Considere-se um elemento de disponibilidade P_{ui} . Tem-se que:

$$P_{ui} = \frac{m}{m+r} \quad \text{onde } m \dots \text{TMPF}$$

$$r \dots \text{TMR}$$

$$= \frac{m}{T} = \frac{1}{\lambda T} = \frac{f}{\lambda}$$

Donde vem:

$$f = P_{ui} \times \lambda_i$$

Portanto, a frequência de transição de condição operante ao 'down' de um elemento é dado pelo produto da probabilidade de condição operante (disponibilidade) pela taxa de falha do elemento.

4.3.2.2 – Procedimento de Cálculo

4.3.2.2.a – Frequências das Interrupções

Seja um sistema constituído de N elementos onde n é o número de nós e m é o número de componentes, isto é, $N = n + m$.

Para se calcular a frequência de interrupções em um dado nó k , considera-se todos os estados compostos l ($l = 1 \dots k$) do espaço amostral definido anteriormente, nas quais o nó k esteja definido em condição operante. A partir de cada estado l , verifica-se quais as transições que interrompem o nó k . Para isso coloca-se cada elemento j de condição operante em condição down, e verifica se isso interrompe o nó k . Para cada estado l , sejam os elementos j ($j = 1 \dots h$), tal que uma falha no elemento provoca interrupção do nó k . Seja λ_j ($j = 1 \dots h$) as respectivas taxas de falha.

A frequência de transição de cada estado l , na qual o nó k estava operante, para outro estado no qual o nó k está inoperante, é dado por:

$$f_{lK} = P_l \sum_{j=1}^h \lambda_j$$

Assim a frequência de saídas do nó k para todos os estados l gerados é dado por:

$$f_k = \sum_{l=1}^k P_l \left(\sum_{j=1}^{h_l} \lambda_j \right) \quad (4.8)$$

onde,

$P_l (l = 1, 2, \dots, k)$ são todos os estados nos quais o nó k está operante e,

$\lambda_j (j = 1, 2, \dots, h_l)$ são taxas de falhas dos elementos cuja falha acarreta interrupção do nó k para cada estado l .

Colocando em evidência cada fator λ_j , tem-se:

$$f_k = (P_{l'1} + \dots + P_{l''1})\lambda_1 + (P_{l'2} + \dots + P_{l''2})\lambda_2 + \dots \\ \dots (P_{l'j} + \dots + P_{l''j})\lambda_j \dots (P_{l'h} + \dots + P_{l''h})\lambda_h \quad ;$$

Tomando-se:

$$(P_{l'j} + \dots + P_{l''j}) = \sum_{l_j=1}^{k_j} P_{l_j} = P_{k,j} \quad (k_j < k)$$

onde:

$P_{k,j}$ é a soma de todas as probabilidades de estados $l_j (l_j = 1 \dots k_j)$ nas quais o nó k está operante e, uma vez que o elemento j falha, leva a uma interrupção do nó k .

A Equação 4.8 pode ser expressa em termos matriciais, abrangendo todos os nós k :

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_k \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{k1} & P_{k2} & P_{k3} & \dots & P_{kN} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & P_{nN} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_N \end{pmatrix}$$

Comumente, a matriz P_{ij} é chamada de matriz **BOLDFACE**.

4.3.2.2.b – Duração Esperada das Interrupções

Como foi visto que no Capítulo 3, as frequências das interrupções podem ser obtidos pelo produto da probabilidade do estado em condição 'down' pela taxa de transição de saídas destes estados. Então,

$$f_k = P_{dk} \times \bar{\mu}_k$$

onde:

f_k é a frequência de interrupções na secção precedente

P_{dk} é a soma das probabilidades dos estados, cujo nó k está inoperante, isto é:

$$P_{dk} = 1 - P_{uk}$$

$\bar{\mu}_k$ é a soma das taxas de saída dos estados cujo nó k está inoperante

Como:

$$\frac{1}{\bar{\mu}_k} = \text{tempo médio de reparo (duração esperada das interrupções no nó k)}$$

tem-se:

$$t_{dk} = \frac{P_{dk}}{f_k}$$

4.3.2.2.c – Cálculo de Efeito de Falha de Cada Elemento sobre um Dado nó k

Define-se o 'efeito' de um j-ésimo elemento sobre um dado nó k, pela fração das interrupções causadas pela falha do j-ésimo elemento em todas as possíveis interrupções do nó k, denotado por C_{kj} .

A frequência das transições dos estados onde o nó k está operante para estados onde o nó k está inoperante, devido a falha do j-ésimo elemento é dado por:

$$f_{kj} = P_{kj} \times \lambda_j$$

A frequência de todas as transições dos estados onde o nó k está operante para estados onde o nó k está inoperante, calculadas anteriormente é igual a f_k , portanto:

$$C_{kj} = \frac{P_{kj} \times \lambda_j}{f_k}$$

4.3.2.3 – Programa Computacional

Para executar o procedimento descrito anteriormente, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem FORTRAN IV, denominado REDE-01.

O programa divide-se essencialmente em 5 partes: geração dos estados compostos, cálculos das probabilidades dos estados, verificação dos efeitos das falhas sobre os nós, acumulação da matriz BOLDFACE e finalmente o cálculo dos parâmetros.

A Figura 4.5 mostra o fluxograma geral do programa REDE-01.

4.3.2.4 – Resultados

Devido a escassa informação disponível, foi estabelecido 2 conjuntos de valores de dados de falha dos elementos, mostrados na Tabela IV.4, para serem processados no programa REDE-01.

Tabela IV.4

Dados de Falha

Elementos	CONJUNTO 1		CONJUNTO 2	
	Taxa de saídas/ano	Duração média (horas)	Taxa de saídas/ano	Duração média (horas)
Subestação Elevadora/ Abaixadoras	0.6	10	1,0	120
Subestação Seccionadoras	0.1	10	0,5	120
Linhas de 500 KV falhas/100 km	0.3	10	2,0	50
Linhas de 345 KV falhas/100 km	0.5	10	2,5	50

Convém salientar aqui, que pode-se obter dados de falha das subestações, mais precisos, fazendo uma análise detalhada, considerando o tipo de arranjo de cada subestação. E, além de considerar saídas de toda a subestação, as saídas parciais causadas por certas falhas na subestação (saída de somente alguns circuitos). Este tipo de estudo pode ser encontrado na referência⁽³²⁾.

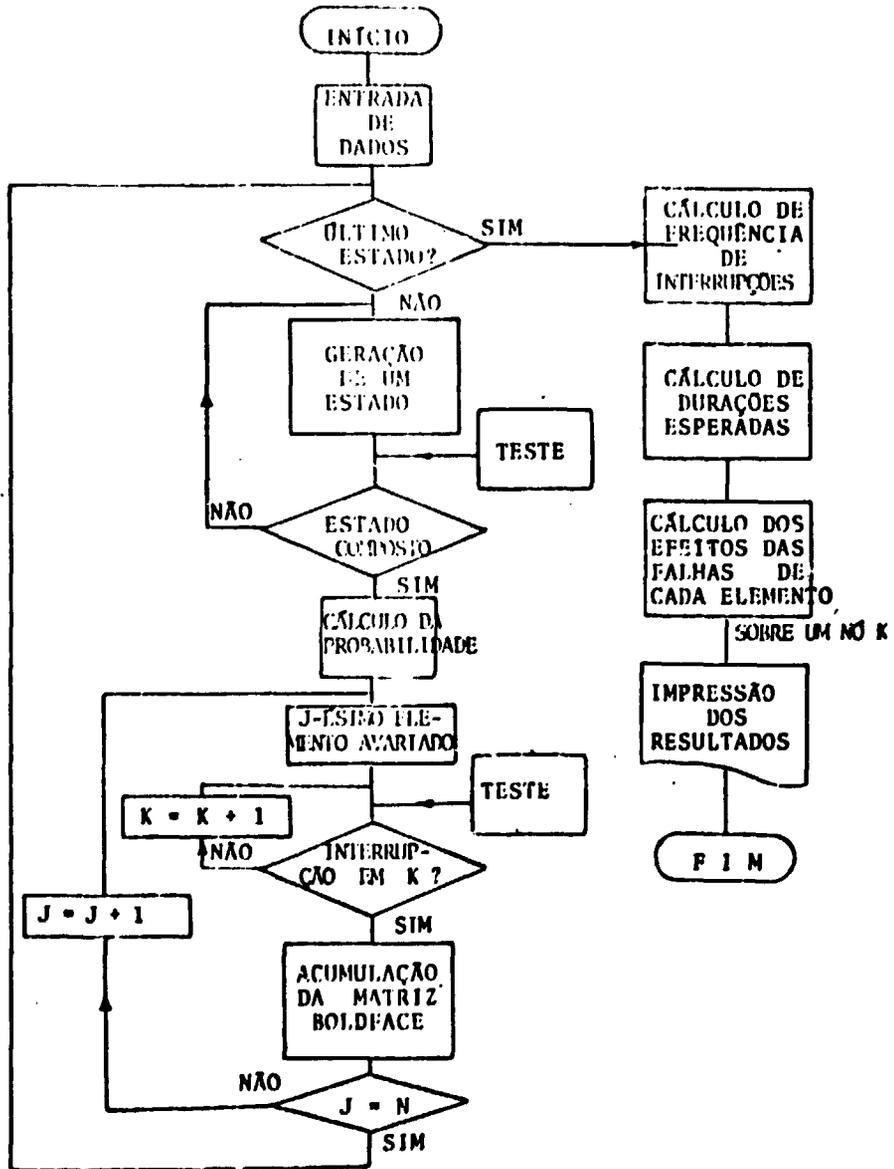


Figura 4.8 - Fluxograma do Programa REDE 01

A Tabela IV.5 mostra as taxas de contribuição mais efetivas de alguns elementos que compõem o sistema de transmissão na interrupção de suprimento de energia elétrica para a Central de Angra.

Tabela IV.5

Taxa de Contribuição dos Elementos na Interrupção de Suprimento para a Central de Angra I

Elementos	Taxa de Contribuição
Linha 500 KV, Marimbondo a Araraquara	0,25%
Linha 345 KV, Estreito a Poços de Caldas	0,25%
Linha 345 KV, Furnas a Itutinga	0,37%
Linha 345 KV, Itutinga a Adrianópolis	0,23%
Subestação de Cachoeira Paulista	0,25%
Linha 500 KV, Cachoeira Paulista a Angra	0,40%
Linha 500 KV, Adrianópolis a Angra	0,42%
Subestação de Angra dos Reis	97,70%

4.3.3 – Determinação dos Parâmetros de Confiabilidade do Sistema Diesel

O sistema de suprimento de emergência – sistema Diesel, é empregado basicamente para fornecer energia elétrica aos dispositivos relacionados com a segurança, no evento da perda do sistema de suprimento externo sob condições normais de operação, ou no evento de um acidente simultâneo com a perda do sistema de suprimento externo. Sob esta última condição exige-se que o sistema tenha uma partida rápida e automática do diesel, para poder colocar em operação todas as cargas de segurança necessárias em menos de 1 minuto.

Testes com diesel e estudos detalhados sobre a natureza e causa das falhas relacionadas com o gerador, motor, sistema de excitação, sistema de partida, sistema de lubrificação e outros tem sido intensivamente feitos^(20,17,13), nos últimos anos.

Comprova-se que a falha que ocorre com maior frequência origina-se de falhas relacionadas com o sistema de partida^(17,4).

Sem entrar numa análise minuciosa, pretenda-se aqui somente obter os valores de λ_D (taxa de falha de diesel em operação), μ_D (taxa de reparo) e γ (probabilidade de falhar na partida do diesel).

Um levantamento de dados de falhas em sistemas diesel, instalados em usinas nucleares, ocorridos desde 1959 até 1973, envolvendo 51 unidades geradoras diesel, foi relatada pelo USAEC⁽¹⁷⁾, e outras publicações são disponíveis.

5 – RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1 – Frequência e Duração Esperada de Perda de Energia nos Barramentos de 4,16 KV

As taxas e a duração esperada de falha de cada componente, obtidas conforme exposto no Capítulo 4, estão apresentadas na Tabela V.1.

Tabela V.1

Parâmetros de Confiabilidade dos Sistemas de
Suprimento de Eletricidade

Componente	Frequência de Falha (/ano)	Duração esperada de falha (horas)	Probabilidade de falha na partida do Diesel
Sistema Santa Cruz de 138 KV	2,78	50	---
Sistema de 500 KV	0,70	10	---
Sistema Diesel	25	66,7	0,03

Para λ_F , tomou-se a média dos valores indicados na Tabela IV.4.

A partir desses resultados, obteve-se a frequência e duração esperada de falha do sistema de suprimento de energia elétrica aos barramentos de segurança 1A3 e 1A4:

$$\text{Frequência de interrupções} = 1,7 \times 10^{-5} / \text{ano}$$

$$\text{Duração esperada de interrupção} = 6,8 \text{ horas}$$

5.2 – Probabilidade de Falha do Sistema de Suprimento

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram a evolução da probabilidade de falha do sistema de suprimento com o decorrer do tempo, da qual pode-se obter o tempo máximo de operação recomendável, sem ameaçar a segurança da usina, enquanto estiver indisponível uma fonte interna ou uma fonte externa de eletricidade.

O valor da probabilidade de falha máxima aceitável ($P_m = 10^{-6}$) foi adotado de acordo com os resultados obtidos por Cave⁽¹⁶⁾, que propôs um modelo para avaliar a mínima confiabilidade exigida de vários sistemas de segurança de centrais nucleares, levando em conta, a magnitude da liberação de

radioatividade para o exterior se tal sistema viesse a falhar, e a frequência dos eventos que exigem a operação desse sistema de segurança.

Para o caso de uma indisponibilidade da Usina de Santa Cruz, e enquanto este estado permanecer, a probabilidade de falha do sistema alcança o valor de P_m em 32 horas. Para o caso de indisponibilidade de um dos geradores Diesel (Figura 5.2), a probabilidade atinge o valor em 114 horas. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram também o comportamento do sistema quando são iniciados em condições mais degradadas. Portanto, nestes estados, recomenda-se que o reator continue em operação, somente dentro dos limites de tempo calculados.

5.3 – Análise de Sensibilidade

A frequência de falha do sistema de suprimento em função da variação percentual de confiabilidade de cada componente, individualmente, está mostrado na Figura 5.3.

Nota-se que essa frequência é mais sensível à variação da confiabilidade do gerador Diesel e do tempo de interrupção do sistema Santa Cruz do que a variação de outros parâmetros.

A frequência é muito pouco sensível às variações de até 100% da probabilidade de falhas na partida do gerador Diesel.

Consequentemente, uma melhora no desempenho do gerador Diesel, em operação, será mais benéfica à segurança da usina do que um mesmo aumento relativo percentual da probabilidade de sucesso na partida quando solicitado.

As variações percentuais foram tomadas a partir dos dados de falha mostrados na Tabela V.1.

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram a sensibilidade do tempo de operação recomendável com a variação percentual dos parâmetros de confiabilidade dos componentes do sistema de suprimento, para os casos de indisponibilidade do Sistema Santa Cruz e de um gerador Diesel, respectivamente.

5.4 – Conclusões e Recomendações

Métodos probabilísticos têm sido pouco utilizados na elaboração de padrões e normas de projeto e como critério de julgamento de tais projetos. Acredita-se que um emprego de métodos probabilísticos para tais finalidades, pode trazer consideráveis benefícios⁽²⁾.

Os resultados, embora obtidos por meio de dados com certa incerteza, estão compatíveis com os índices de riscos aceitáveis dentro dos padrões atuais.

Da análise de sensibilidade pode-se concluir que:

- 1) A eficiência do sistema de suprimento depende acentuadamente do desempenho do sistema Diesel em operação. O efeito da variação de confiabilidade das fontes externas sobre o sistema é de menor importância que os efeitos das variações dos sistemas Diesel.
- 2) A variação da confiabilidade de partida do diesel dentro do intervalo de 10% a 90%, não afeta sensivelmente a eficiência do sistema.
- 3) Embora a confiabilidade das duas fontes externas sejam diferentes, uma mesma variação percentual de confiabilidade para as duas fontes produzem o mesmo efeito na eficiência do sistema.

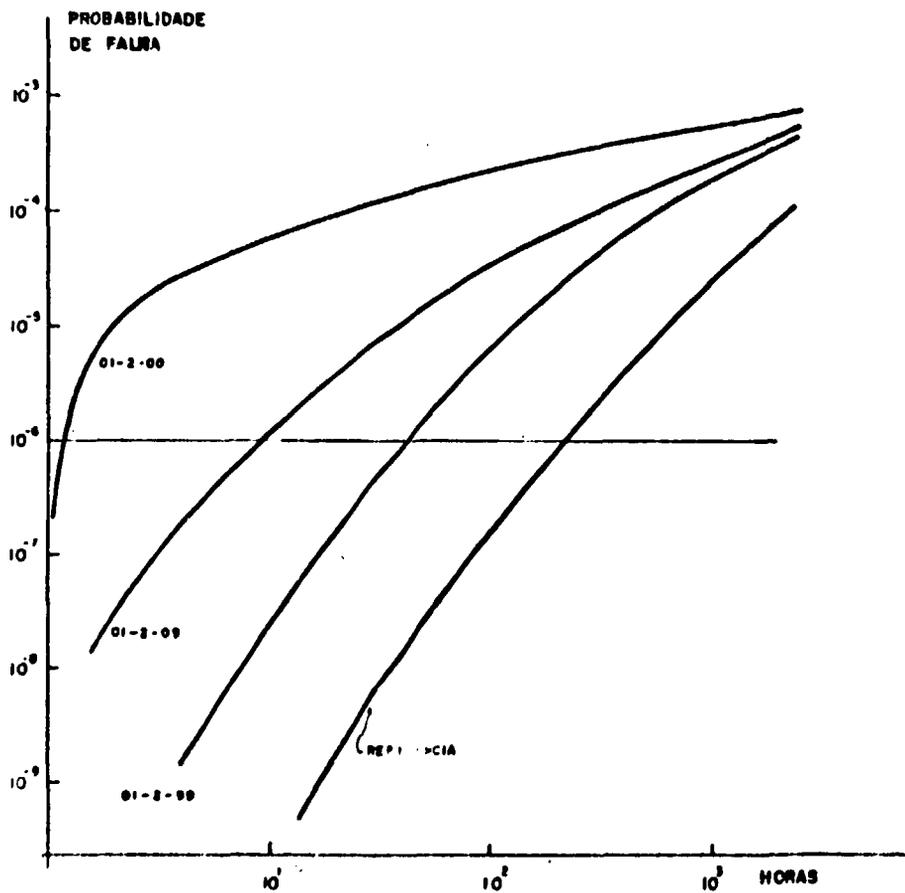


Figura 5.1 – Evolução da Probabilidade de Falha do Sistema, Enquanto Sistema 138 KV Indisponível

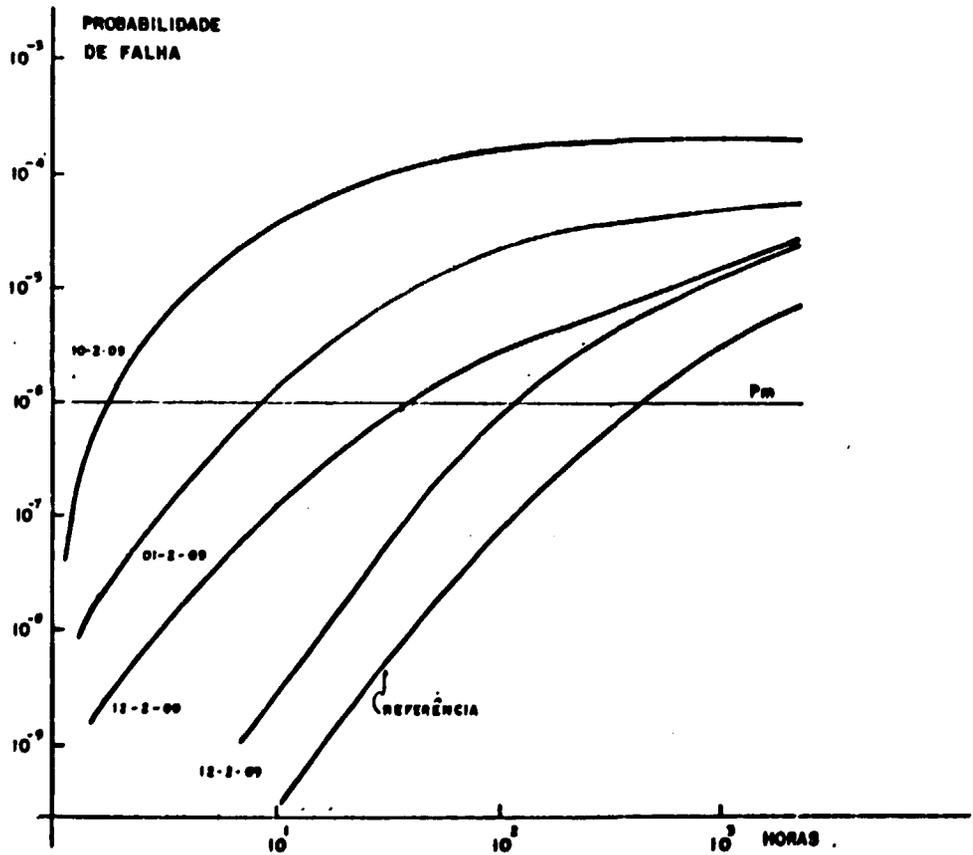


Figura 5.2 - Evolução da Probabilidade de Falha do Sistema, Enquanto um Sistema Diesel Indisponível

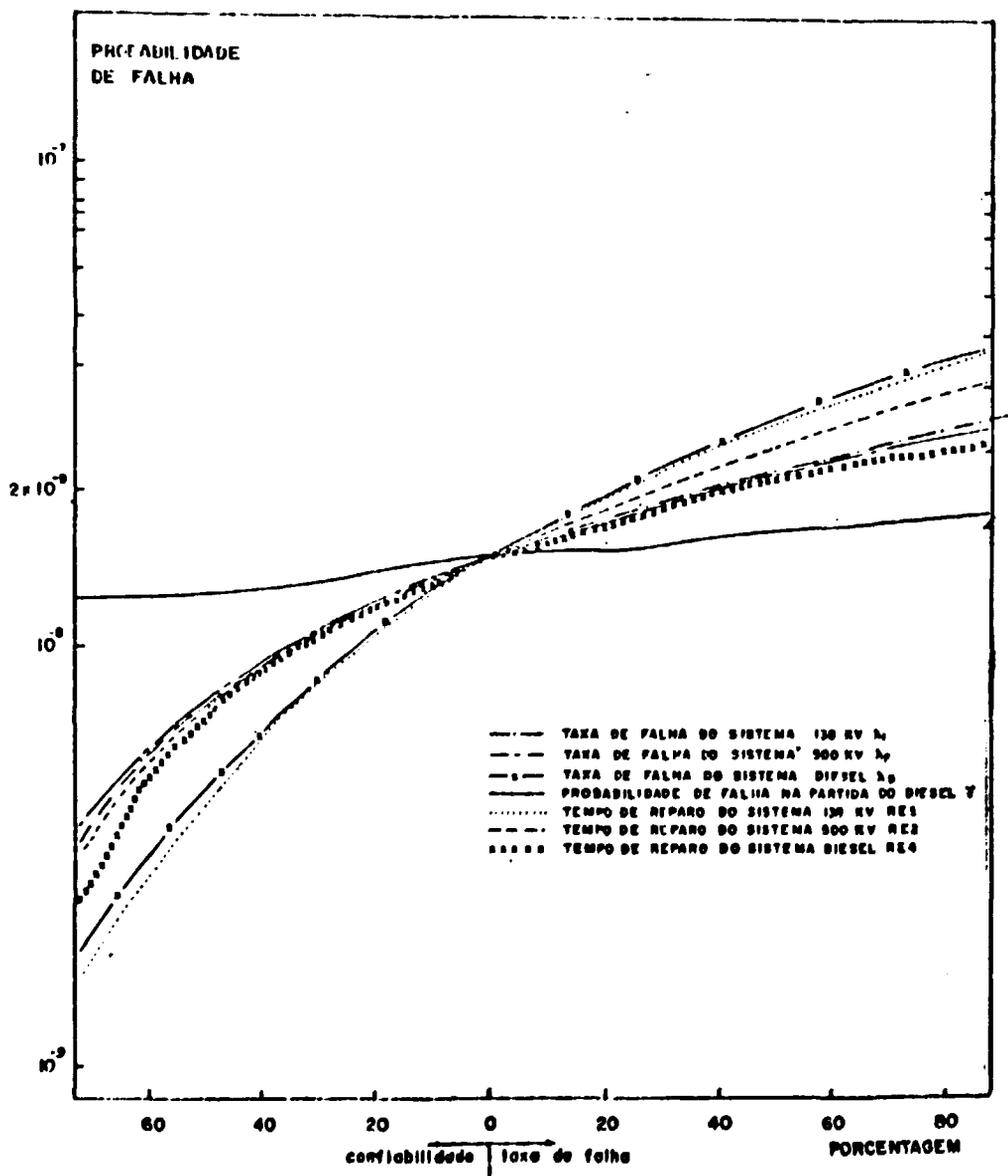


Figura 5.3 – A Frequência de Falha do Sistema de Suprimento em Função da Variação Percentual dos Parâmetros

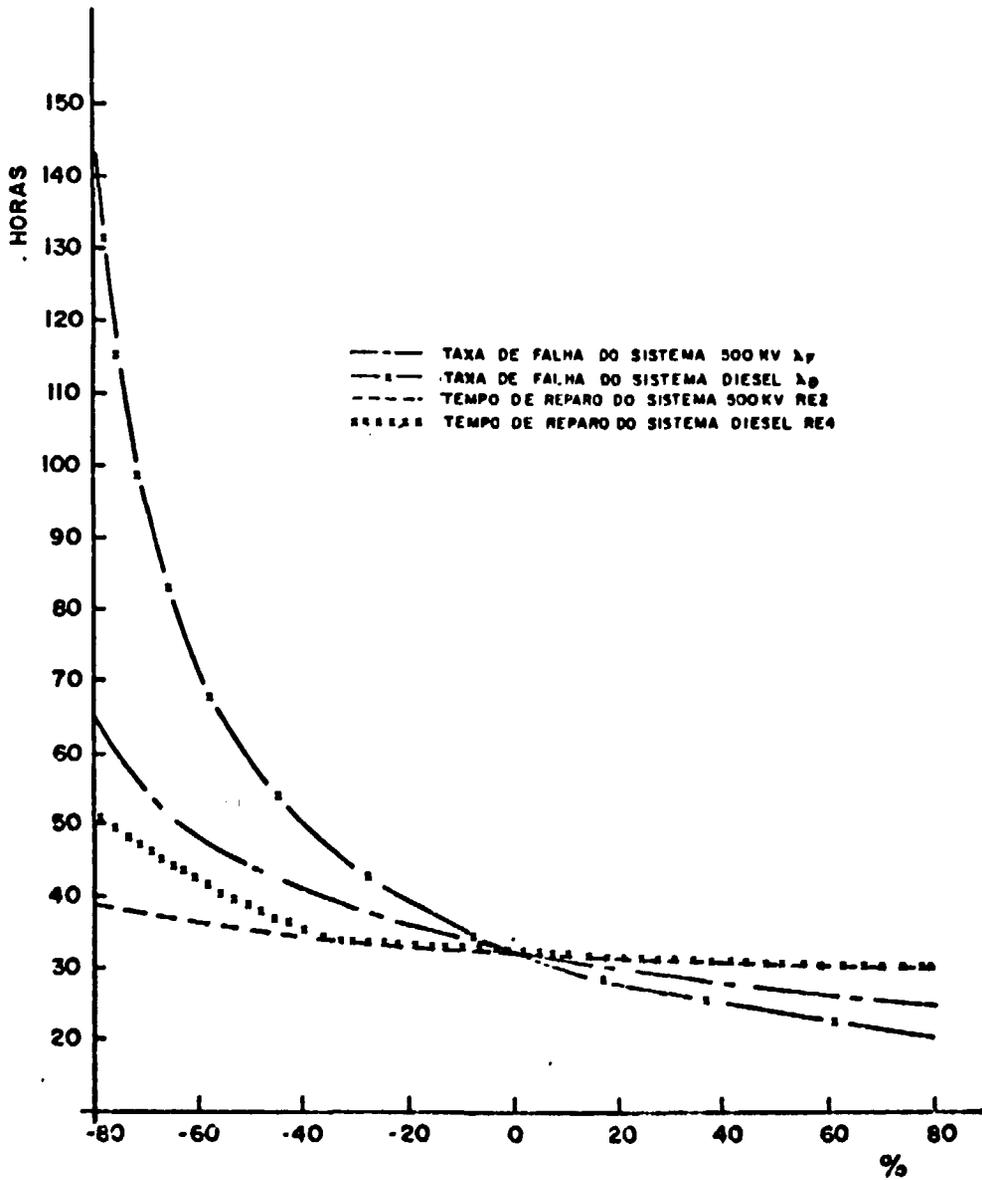


Figura 5.4 - Tempo Recomendável do Reator Operar Sob Sistema Santa Cruz Indisponível

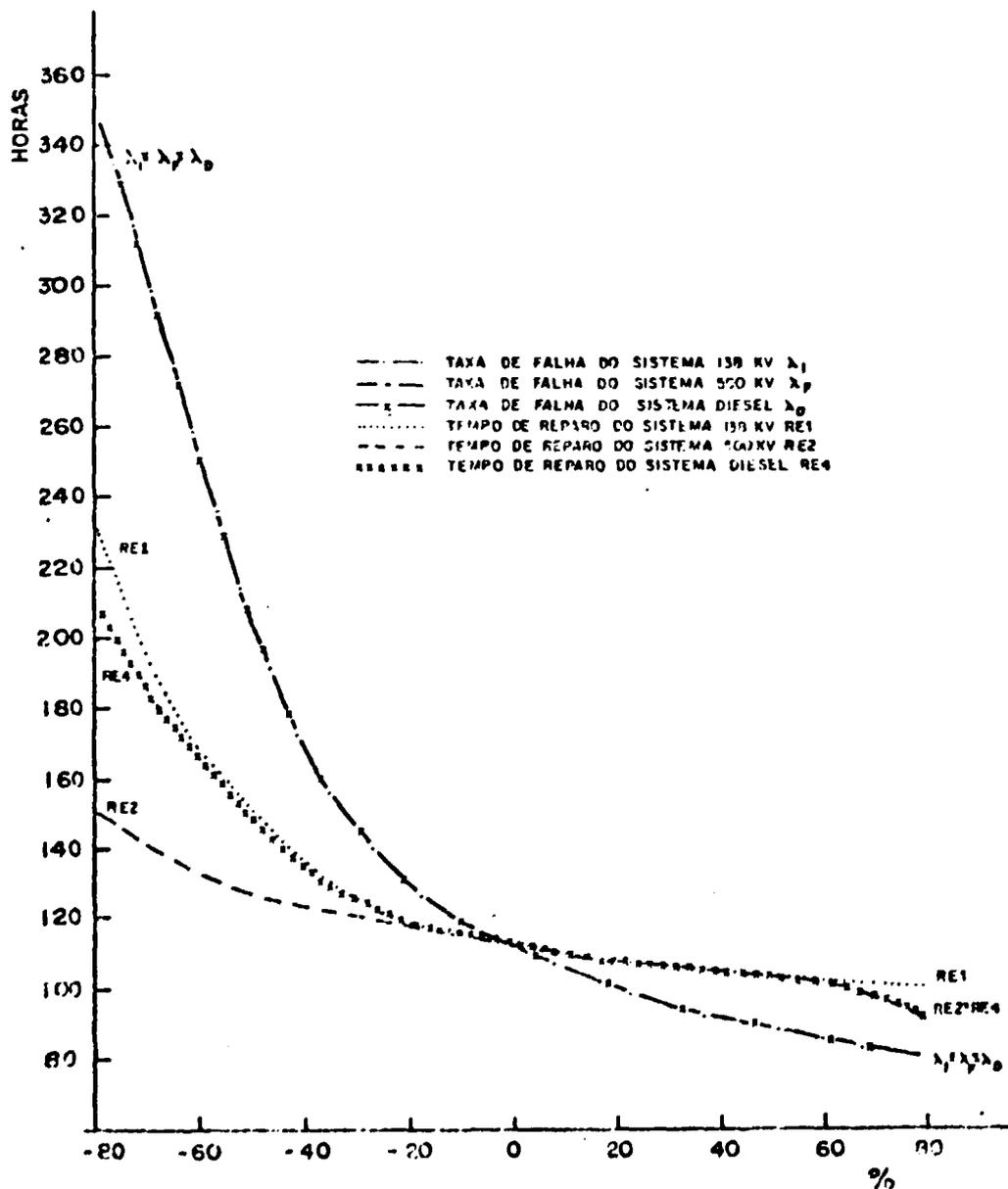


Figura 5.6 - Tempo Recomendável do Reator Operar Sob um Sistema Diesel Indisponível

- 4) Uma diminuição do tempo de interrupção do Sistema Santa Cruz tem um efeito maior sobre o sistema de suprimento do que uma mesma diminuição percentual do tempo de reparo dos outros componentes.

O modelo teórico da análise de falhas, embora possa ser aperfeiçoado em seus detalhes, apresenta uma grande fonte de incerteza dos resultados a qual reside, fundamentalmente, na pobreza dos dados de entrada que, por sua vez, é consequência da inexistência de dados estatísticos apropriados dos componentes que perfazem o sistema. Portanto, a recomendação principal para um aperfeiçoamento posterior do presente trabalho é a de produzir dados de falha mais precisos e completos. Notadamente, para o caso do Sistema de Angra I, existe a necessidade de um aperfeiçoamento urgente destes dados.

Outra recomendação de maior importância é uma investigação detalhada do sistema da Usina geradora de Santa Cruz. Este sistema, como se pode notar, desempenha papel fundamental para a confiabilidade do suprimento de eletricidade aos barramentos de segurança de Angra I.

Finalmente, recomenda-se estudar os problemas de instabilidade na rede elétrica que podem causar interrupções de suprimento de energia elétrica a Central Nuclear de Angra I, estudo este que transcende aos objetivos propostos para o presente trabalho.

ABSTRACT

The reliability of the electrical power supply to the 4.16 KV buses for the safety system operation of a nuclear power plant was studied. Particularly, Angra Unit I system was focused.

Initially, the reliability of each electrical supply source was estimated. Using a probabilistic approach based on the Markov processes, the system reliability was evaluated in terms of frequency and duration of loss of power supply and of the system failure probability evolution when one or more sources remained unavailable. Based on these results, certain reactor operating rules were proposed concerning later shutdown of the plant without compromising the nuclear reactor safety.

A sensitivity analysis was also performed to show the different reliability parameter influences on final results. This analysis showed that the diesel system performs an important role in the power supply for a nuclear power plant.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLAN, R. N.; BILLINTON, R.; OLIVEIRA, M. F. de. Reliability evaluation of auxiliary electrical systems of power stations. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-96 (5):1441-8, Sep. Oct. 1977.
2. APOSTALAKIS, G. E. & OKRENT, D. On the use of probabilistic methods for risk assessment and for standard. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 26:404-5, Jun. 1977.
3. BARBOSA, J. O. Método de probabilidade condicional aplicada a estudos de confiabilidade. In: 1º Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, São Paulo 10-15 abril 1972; Anais, v. 4: Sistemas de Potência. Rio de Janeiro, Furnas Centrais Elétricas, [s.d.]. (SP/GSP/09).
4. BENDER, R. J. Standby diesels improve reactor safety with electric backup for key auxiliaries. *Power*, 114(5):65-7, May 1969.
5. BHAVARAJU, M. P. & BILLINTON, R. Transmission system reliability methods. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-91 (2):28-37, Mar. Apr. 1972.

6. BILLINTON, R. *Power system reliability evaluation*. New York, Gordon and Breach, 1970.
7. BILLINTON, R. & BHAVARAJU, M. P. Transmission planning using a reliability criterion, part 1: A reliability criterion. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-89(1):28-34, Jan. 1970.
8. BILLINTON, R. & BOLLINGER, K. E. Transmission system reliability evaluation using Markov processes. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-87(2):538-47, Feb. 1968.
9. BILLINTON, R. et alii. *Power-system reliability calculations*. Cambridge, Mass., MIT, 1973.
10. BLIN, A.; CARNINO, A.; BOURSIER, M.; GREPPO, J. F. Determination, par une approche probabiliste, d'une règle d'exploitation des alimentations de 6,6 KV des réacteurs à eau sous pression (tranches de 900 MW(e)). In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY *Reliability of nuclear power plants: proceedings of a symposium on . . . held at Innsbruck, 14-18 April 1975*. Vienna, 1975. p.333-50. (Proceedings series; STI/PUB/ 403).
11. BLIN, A.; BOURSIER, M.; CARNINO, A.; GREPPO, J. F. PWR electrical supply operating rules determined by probabilistic approach. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 20:458-9, Apr. 1975.
12. BORBA, P. R. *Cálculo das probabilidades de falha de suprimento de energia elétrica dos barramentos de classe IE da usina nuclear de Angra I*. São Paulo, 1978. (Dissertação de Mestrado).
13. BORST, A. Standby and emergency power supply of German nuclear power plants. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-95(4):1080-90, Jul. Ago. 1976.
14. BULLOCK, J. PWR generating unit: experience with class I electrical systems. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-92(1):50-5, Jan. Feb. 1973.
15. CAVE, L. The relationship between reliability and safety in nuclear power plants. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Reliability of nuclear power plants: proceedings of a symposium on . . . held at Innsbruck, 14-18 April 1975*. Vienna, 1975. p.491-502. (Proceedings series; STI/PUB/403).
16. CHRISTIAANSE, W. R. A technique for the analysis of repairable redundant systems. *IEEE Trans. Reliab.*, R-19(2):53-60, May 1970.
17. CROOKS, J. L. & VISSING, G. S. *Diesel generator operating experience at nuclear power plants*. Washington, D. C., United States Atomic Energy Commission, Office of Operations Evaluation, Jun. 1974. (OOE-ES-002).
18. DESIENO, C. F. & STINE, L. L. A probability method for determining the reliability of electric power systems. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-83:174-81, Feb. 1964.
19. ELETROBRÁS. Sub-comitê de manutenção. *Desempenho de equipamentos e Instalações, 1ª parte: terminologia*. [s.1.] dez. 1974. (SCM.006).
20. FOLEY JR., W. J. Testing of diesel electric generating sets for nuclear service. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-92(1):352-5, Jan. Feb. 1973.
21. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S/A. *Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. UNIT-1: final safety analysis report*. Rio de Janeiro, 1977.
22. GANGEL, M. W. & RINGLEE, R. J. Distribution system reliability performance. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-87:1667-66, Jul. 1968.

23. GAVER, D. P. et alii. Power system reliability. I. Measures of reliability and methods of calculation. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-83:727-37, Jul. 1964.
24. GROVER, M. S. & BELLINTON, R. A computerized approach substation and switching station reliability evaluation. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-93(5):1488-97, Sep. Oct. 1974.
25. GUERTIN, M. B. & LAMARRE, Y. Reliability analysis of substation with automatic modelling of switching operations. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-94(5):1599-608, sep. Oct. 1975.
26. LOSS of electric power coincident with LOCA. *Nucl. saf.*, 18(1) 53-9, Jan. Feb. 1977.
27. MALLARD, S. A. & THOMAS, V. C. A method for calculating transmission system reliability. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-87(3) 824-34, Mar. 1968.
28. MONTMEAT, F. E. et alii. Power system reliability. II – Applications and computer program. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-84 636-43, Jul. 1965.
29. NARESKI, J. J. Reliability definitions. *IEEE Trans. Reliab.*, R-19(4):198-200, Nov. 1970.
30. NITU, V. I. The philosophy of substation reliability. *Electra*, (54) 47-64, Oct. 1977.
31. PALAMIDESSI, A. et alii. Reliability analysis of electrical power supply systems. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Reliability of nuclear power plants: proceedings of a symposium on... held at Innsbruck, 14 – 18 April 1975*. Vienna, 1975. p.407-21. (Proceedings series; STI/PUB/403).
32. PEIXOTO, C. A. de O. & KASTRUP FILHO, O. Estudos de arranjos de barramentos para subestações do sistema de 500 KV de Furnas. In: 1º SEMINÁRIO Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, São Paulo 10-15 Abril 1972; Anais, v.3: transmissão da energia elétrica. Rio de Janeiro, Furnas Centrais Elétricas S/A, [s.d.]. (SP/GTR/13).
33. PINHEIRO, R. P. & WERDINE JR., H. *Sistema de distribuição elétrica*. [s.L.], Furnas Centrais Elétricas, Usina Nuclear de Angra I, 1976. [Apostila do curso SBUN].
34. POWER system planning: seminar organized by CESP. São Paulo, Companhia Energética de São Paulo, Mar. 1978.
35. REACTOR safety study: an assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants. Washington, D. C., United States Nuclear Regulatory Commission. Oct. 1975. (WASH-1400; NU(REG-75/014).
36. REPORT on reliability survey of industrial plants, part I: reliability of electrical equipment. *IEEE Trans. Ind. Applic.*, IA-10(2) 213-35, Mar./Apr. 1974.
37. RINGLEE, R. J. & GOODE, S. D. On procedures for reliability evaluations of transmission systems. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-89(4) 527-37, Apr. 1970.
38. STRAUSS, S. D. Nuclear power plant safety. *Power*, 112(1):159-66, Jan. 1968.
39. STUTE, H. & MITSOSTERGIOS, K. Reliable systems for electrical power supply in nuclear power plants. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Principles and standards of reactor safety: proceedings of a symposium on... held at Juelich, 5-9 February 1973*. Vienna 1973. p.79-91. (Proceedings series, STI/PUB/342).



INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal, 11049 – Pinheiros
CEP 05508
01000 – São Paulo – SP

Telefone: 211-6011
Endereço Telegráfico – IEATOMICA
Telex – 011-23502 IENA BR