

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTRIBUIÇÕES PARA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE ANÁLISE
MARKOVIANA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

ROSANA SELIGMAN

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO - 1985

CONTRIBUIÇÕES PARA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE ANÁLISE
MARKOVIANA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

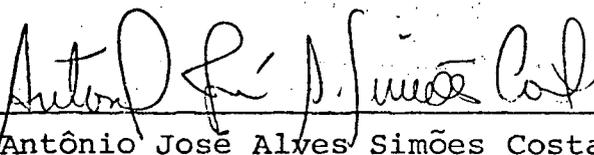
ROSANA SELIGMAN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÁTRICA E APROVADA
EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

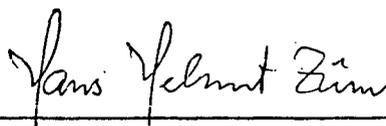
Orientador



Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.

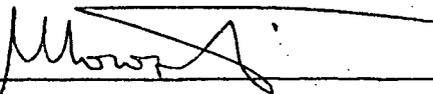
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

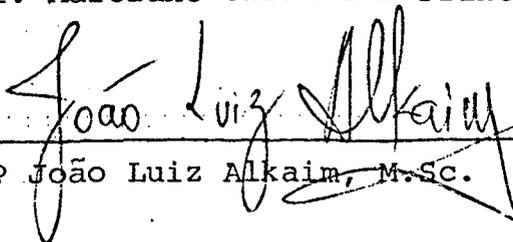


Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

Presidente



Prof. Marciano Morozowski Filho, M.Sc.



Engº João Luiz Alkain, M.Sc.

A meus Pais.

Aos meus sobrinhos,

Bruno, Daniel e Felipe.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Hans Helmut Zörn, pela dedicação, incentivo, amizade e inestimável ajuda prestada na orientação deste trabalho.

Aos colegas, professores e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para sua realização.

Aos amigos Luiz e Fátima Cabreira pela carinho e amizade que me dedicaram nesta etapa de minha vida.

Aos meus pais, irmãos e cunhados pelo incentivo e apoio.

A Marlei, pelo excelente trabalho datilográfico e a João Luiz, pela elaboração cuidadosa do desenho.

À CEEE, através do Departamento de Análise de Sistemas de Engenharia, DASE-SSPD, pela colaboração e estímulo.

À CNEN pelo apoio financeiro.

R E S U M O

Este trabalho trata da análise estatística das ocorrências de falha e reparo de um sistema de distribuição.

Para validar as funções distribuição das ocorrências de falha, reparo e aglutinação de falhas é utilizado o teste de aderência do χ^2 .

As taxas de falha e de reparo são obtidas a partir do modelo de médias móveis para estudo das variações sazonais e do desempenho do sistema.

O trabalho estabelece algoritmos para, com dados de campo, calcular parâmetros para uma análise de confiabilidade do sistema, notadamente taxas de ocorrência de falha e reparo de subsistemas em diferentes condições climáticas, bem como as taxas de transição climática. A partir destes parâmetros, é proposta uma nova técnica de manutenção, utilizando o Processo de Markov.

Os resultados obtidos no trabalho permitem monitorar o desempenho global do sistema de distribuição.

A B S T R A C T

This work is concerned with the statistical analysis of failure and repair occurrences in a power distribution system.

To validate the probability distribution functions of occurrences of failure, repair and failure bunching the χ^2 adherence test is used.

In addition failure and repair rates are obtained from the moving average model to study seasonal variations and to evaluate the performance of the system.

The work establishes algorithms to compute parameters from field data in order to analyze the system reliability, namely failure and repair rates of subsystems under different climate conditions, as well as the weather transition rates. With these parameters a new maintenance technique is proposed, using Markov process.

The results obtained in this work allow the monitoring of the global performance of the distribution system.

S U M Á R I O

RESUMO	iv
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II - METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	
2.1 - Introdução	06
2.2 - Análise de Falhas	07
2.2.1 - Definição de Falha	07
2.2.2 - Modos de Falha	09
2.2.3 - Função Densidade de Falha, Taxa de Falha e Função de Distribuição de Falha	11
2.2.3.1 - Função de Densidade de Falha	11
2.2.3.2 - Taxa de Falha	12
2.2.3.3 - Função de Distribuição de Falha ...	12
2.3 - Frequência e Duração das Interrupções	13
2.3.1 - O Ciclo Falha-Reparo, Tempo e Disponibilidade	13
2.3.2 - Componentes Reparáveis em Série	15
2.3.3 - Componentes Reparáveis em Paralelo	17
2.3.4 - Eventos Independentes para mais de Dois Componentes	18
2.3.4.1 - Um de Três Componentes em Falha ...	18

2.3.4.2 - Dois de Três Componentes em Falha ..	19
2.4 - Processo de Markov	19
2.4.1 - Introdução	19
2.4.2 - Espaço de Estado	22
2.4.3 - Aplicação de Markov para Vários Estados	23
2.4.4 - Processos Contínuos de Markov	25
2.4.5 - Exemplos de Soluções do Processo Contínuo de Markov	28
2.4.5.1 - Solução em Regime Permanente	28
2.4.5.2 - Solução em Regime Transitório	30
2.5 - Processo de Poisson	33
2.6 - Considerações Finais	34

CAPÍTULO III - CONFIABILIDADE NA OPERAÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

3.1 - Introdução	35
3.2 - Classificação das Interrupções na Distribuição de Ener <u>g</u> <u>g</u> ia Elétrica	36
3.3 - Índices de Desempenho de Confiabilidade	37
3.3.1 - Duração Equivalente por Consumidor	38
3.3.2 - Duração Equivalente por Potência Instalada ...	39
3.3.3 - Duração Média por Consumidor	39
3.3.4 - Duração Média por Potência Instalada	40

3.3.5 - Frequência Equivalente por Consumidor	40
3.3.6 - Frequência Equivalente por Potência Instalada.	40
3.3.7 - Disponibilidade Equivalente por Consumidor ...	41
3.3.8 - Disponibilidade Equivalente por Potência Instalada	41
3.3.9 - Exemplos Numéricos de Índices de Confiabilidade	42
3.4 - Reparos no Sistema de Distribuição	43
3.4.1 - Introdução	43
3.4.2 - Controle de Operação do Sistema de Distribuição	43
3.4.3 - Dimensionamento de Turmas para Reparo no Sistema	46
3.4.4 - Determinação do Número de Turmas	46
3.4.5 - Ociosidade das Turmas	52
3.5 - Análise da Confiabilidade de Um Sistema sob Reparo Limitado	53
3.5.1 - Introdução	53
3.5.2 - Descrição do Algoritmo Proposto	54
3.5.3 - Descrição dos Modos de Reparo	57
3.5.4 - Frequência de Mudança e Duração Média de Permanência nos Níveis de Falha	63
3.6 - Considerações Finais	64

CAPÍTULO IV - AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS DO DESEMPENHO DA
CONFIABILIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

4.1 - Introdução	66
4.2 - Características Gerais do Sistema Exemplo	67
4.3 - Estimativa de Taxas de Ocorrências dos Desligamentos do Sistema	68
4.3.1 - Ajustamento de Curvas	68
4.3.1.1 - Metodologia Aplicada	68
4.3.1.2 - Resultados Obtidos	69
4.3.2 - Modelo das Médias Móveis, Acumuladas e Sobre postas	80
4.3.2.1 - Metodologia Aplicada	80
4.3.2.2 - Resultados Obtidos	81
4.4 - Considerações Finais	84

CAPÍTULO V - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLI
MÁTICAS E DA POLÍTICA DE REPARO SOBRE O
DESEMPENHO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

5.1 - Introdução	85
5.2 - Influências das Condições Climáticas	86
5.2.1 - Modelo Desenvolvido	87
5.3 - Aplicação do Método de Markov	101
5.3.1 - Considerando Transições Climáticas	101

5.3.2 - Aplicação de Markov a Reparos Limitados	102
5.3.3 - Exemplos de Aplicação de Markov	103
5.3.4 - Cálculo de Frequência de Mudança de Estado e Duração Média de Permanência nos Estados ...	113
5.4 - Considerações Finais	116
 CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TR <u>A</u> BALHOS	
6.1 - Síntese do Trabalho	118
6.2 - Conclusão do Trabalho	120
6.3 - Sugestões para Futuros Trabalhos	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
 APÊNDICE I - MODELOS E FUNÇÕES PROBABILÍSTICAS <u>APLI</u> CÁVEIS A CONFIABILIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	
	128
 APÊNDICE II - DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DOS <u>DA</u> DOS DO PROGRAMA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E DURAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES	
	147
 APÊNDICE III - DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DOS DADOS DO PROGRAMA DE DETERMINAÇÃO DE TAXAS DE TRANSIÇÃO CLIMÁTICA, FALHA E REPARO	
	155

APÊNDICE IV - DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DOS DADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO DAS PROBABILIDADES DE PERMANÊNCIA NOS ESTADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE MARKOV 157

APÊNDICE V - DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DOS DADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO DE MÉDIAS MÓVEIS 163

APÊNDICE VI - BANCO DE DADOS DE FALHAS E REPARO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 167

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica tem como função converter, transportar e distribuir energia elétrica com eficiência, sendo assim constituído por três subsistemas principais:

- a) Subsistema gerador, que converte energia primária em energia elétrica.
- b) Subsistema de transmissão, que transporta energia elétrica dos centros de carga aos centros de consumo.
- c) Subsistema de distribuição, que distribui aos consumidores a energia recebida do subsistema de transmissão.

Seu objetivo é gerar energia elétrica em quantidades suficientes e nos locais mais apropriados, transmití-la em grandes quantidades aos centros de carga, distribuindo-a a consumidores individuais, em forma e qualidade apropriada, e com o menor custo econômico possível [25].

O sistema de distribuição, parte importante do sistema elétrico, fornece a ligação final entre o sistema gerador e o consumidor. Em muitos casos, estas ligações são de natureza radial e suscetíveis a saídas forçadas devido a um único evento.

As saídas resultam em interrupções aos consumidores, e estas são, normalmente, de natureza local e têm diferentes efeitos de distúrbios na rede do Sistema |16,17|.

A análise de confiabilidade tem sido de suma importância para sistemas elétricos de potência e se divide em dois segmentos fundamentais, quais sejam, de medição de modelos passados e previsão de modelos futuros. Ambas as aplicações envolvem colecionamento de dados e saídas do sistema, e o nível e complexidade do sistema de colecionamento de dados é inteiramente dependente do uso a ser feito destes |16|.

A análise de confiabilidade avalia os métodos gerais aplicados em componentes ou sistemas, de modo a assegurar sua continuidade de serviço. A análise ainda estabelece as leis de falha em dispositivos ou sistemas e os métodos que permitem melhorar a qualidade do componente, mediante a introdução de índices quantitativos de qualidade de produção |6|. A teoria da confiabilidade emprega os métodos da estatística matemática e da teoria das probabilidades. Elabora princípios, que permitem a grandes sistemas funcionarem, mesmo quando algum de seus componentes esteja defeituoso. Essa teoria trabalha com várias fontes de incertezas, como: tempo de ocorrência de falhas, tempo de reparo de falhas, número de falhas ocorridas em um período, intensidade de pico de carga, data de entrada de novas instalações em serviço, frequência e duração das condições climáticas.

Entende-se aqui como CONFIABILIDADE, o grau de continuidade com que o sistema elétrico supre energia aos pontos de interligação. Há vários métodos para medir este grau de continuidade. A seleção do método mais apropriado dependerá do problema e do grau de continuidade, que o sistema exige. Há três fatores

importantes, nesta seleção;

- a) Disponibilidade do modelo matemático adequado.
- b) Estabelecimento de índices de riscos apropriados ou índice de desempenho do serviço.
- c) O acesso a dados de falha e operação de componentes ou sistemas.

O primeiro item é obtido a partir do conhecimento dos técnicos especializados nesta área; o segundo depende de um certo grau de subjetivismo, da noção de desempenho do serviço, das características do sistema e dos objetivos do estudo. O terceiro item é muito importante a qualquer modelo e nem sempre acompanha a evolução das técnicas de modelagem [6].

O trabalho apresentado tem como objetivo inicialmente analisar estatisticamente as ocorrências de falhas de um sistema elétrico de distribuição e posteriormente aplicar uma metodologia de atendimento de emergência com limitação do número de equipes de reparo. Devido à possibilidade de utilizar o banco de dados de um sistema de distribuição de energia elétrica, da CEEE, oportunizou-se uma análise estatística das ocorrências de desligamentos e de reparos verificando que tipo de função de distribuição podem ser associadas a essas ocorrências permitindo avaliar-se de quanto diferem da função exponencial, normalmente utilizada em análises de confiabilidade. Esta investigação fornece, a partir dos dados de campo, parâmetros para uma análise global do desempenho do sistema, além dos índices operativos tradicionalmente adotados [12].

Na análise estatística das ocorrências de desligamento do sistema foram utilizados dois métodos. O primeiro método, ajustamento de curvas, descreve a função de distribuição da ocorrência de falha ou reparo sob qualquer condição climática. É feita em relação a um dado subsistema de distribuição. O segundo é o método de cálculo das médias móveis, que identifica as taxas de transição. Este método pode calcular médias acumuladas e sobrepostas e avalia a evolução gradativa do desempenho do sistema e a sazonalidade.

A metodologia para atendimentos de emergência com limitação do número de equipes de manutenção utiliza o Método de Markov com reparos restritos, sendo exemplificado com quatro modelos diferentes em relação ao limite do número de equipes de atendimento. As falhas são parciais e o sistema é agrupado em níveis de igual número de falhas. Foi, também, utilizado Markov para inclusão do modelo de clima, sem o agrupamento dos estados em níveis de falha.

O trabalho aqui apresentado se divide em seis Capítulos.

O Capítulo 2 descreve as metodologias de análise de confiabilidade, dando enfoque a análise de falhas, frequência e duração das interrupções e aos processos de Poisson e Markov.

O Capítulo 3 trata da confiabilidade na operação de sistemas, ressaltando a classificação das interrupções na rede de distribuição, os índices de desempenho de confiabilidade e um estudo sobre reparos no sistema.

O Capítulo 4 faz uma avaliação estatística do desempenho da confiabilidade de redes de distribuição, descrevendo as metodologias de ajustamento de curvas e cálculo das médias móveis.

veis, acumuladas e sobrepostas, apresentando uma análise dos resultados obtidos.

O Capítulo 5 analisa as influências das condições climáticas e a política de reparo sobre o desempenho do sistema, apresentando os resultados obtidos.

O Capítulo 6 apresenta conclusões sobre a eficiência dos métodos apresentados e sugestões para futuros trabalhos.

São apresentados seis Apêndices para descrever funções probabilísticas (Apêndice I), os programas desenvolvidos (Apêndice II a V) e as peculiaridades do Banco de Dados de Ocorrências de falha no sistema exemplo utilizado no trabalho (Apêndice VI).

C A P Í T U L O II

METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE2.1 - Introdução

A complexidade dos sistemas técnicos empregados atualmente, aliada às exigências severas de condições operativas ou de um alto grau de automação levou ao desenvolvimento de várias metodologias adotadas na confiabilidade, algumas das quais são descritas neste capítulo, e são utilizadas nas fases de planejamento, projeto, fabricação, recepção, transporte e operação de componentes ou sistemas, para assegurar o máximo de eficiência, segurança e economia.

Os métodos de estatística matemática e da teoria da probabilidade são utilizados para permitir a melhoria da qualidade do sistema.

Neste capítulo, são apresentados aspectos relativos à teoria da confiabilidade e divide-se em quatro seções. A primeira seção define falhas e descreve a função distribuição de falhas, a segunda define frequência e duração das interrupções, descrevendo taxa de falha, taxa de reparo e período. As duas últimas seções abordam, respectivamente, o Processo de Markov e o Processo de Poisson. Estes processos são utilizados nos algoritmos desenvolvidos neste trabalho.

2.2 - Análise de Falhas

2.2.1 - Definição de Falha

Falha é o término da habilidade ou a impossibilidade de de um componente em desempenhar sua função requerida.

As falhas ocorrem no sistema em componentes independentes e componentes redundantes e podem ser divididas em falhas devido a saídas forçadas não programadas e a saídas programadas do sistema.

Um estudo das maneiras pelas quais um equipamento ou sistema falha é essencial para qualquer previsão ou análise de confiabilidade [11].

P.H. Fowler classifica as falhas em 3 categorias:

- 1 - O sistema falhou, porque não poderia ser empregado naquele ambiente.
O projeto é incapaz de desempenhar sua função, devido a:
 - a) Combinação impraticável dos componentes.
 - b) Lógica funcional do sistema incorreta.
 - c) Uso além da capacidade do sistema.
- 2 - O equipamento, embora bem projetado, falhou devido a problemas de montagem.
- 3 - O sistema funcionou, mas falhou por motivo de desgaste.

Um aspecto muito importante da análise de falhas é o problema da detecção de falha devido às condições sob as quais esta foi detectada.

Por exemplo, um disjuntor fechado, não acionado, pode continuar com sua missão sem atuar, satisfatoriamente, até ser chamado. Havendo defeito no funcionamento do disjuntor, sua causa pode ser detectada ou não dependendo de testes, manutenção e procedimentos de operação.

O efeito da falha de um componente sobre o sistema depende da natureza da causa por que ocorreu a falha.

Incidentes falsos são considerados eventos do tipo testes, manutenção preventiva e reparos e podem ser inseridos nesta última classificação.

Outro fator importante são as condições climáticas, sob as quais a interrupção ocorre.

Quando há um ambiente atmosférico adverso, a probabilidade de ocorrer uma falha pode aumentar.

A duração da falha é importante na sua análise: as falhas ditas temporárias ou momentâneas, são de até três minutos, por exemplo, norma estabelecida pelo DNAEE, na PORTARIA 046, enquanto as que permanecem além deste tempo são chamadas falhas persistentes.

As falhas do sistema de distribuição podem apresentar alto grau de dependência mútua, influenciadas pelas condições ambientais adversas. Isto se deve à exposição ambiental quase total de seus componentes e também à transferência de carga de um componente para outro por via de alterações dos caminhos de fluxo do sistema. Isto pode causar o fenômeno de cascata, ou seja, desligamento associado de vários componentes, causando um desligamento

de caráter generalizado [22].

2.2.2 - Modos de Falha

1 - Saídas Forçadas

- Simples

Envolve um único componente.

- Múltiplas

Envolve mais de um componente

* Independente

* Associadas

a) Dependentes

b) Modo Comum

As saídas múltiplas incluem combinações de vários modos de falha, como por exemplo, uma saída de modo comum de uma linha de rede seguida pela saída dependente de um circuito ligado à rede.

As saídas forçadas múltiplas independentes compreendem as indisponibilidades superpostas de vários componentes, com causas independentes. Por exemplo, uma saída por descarga atmosférica, superposta à saída de outro circuito por ruptura do isolador. Neste caso, normalmente atua a proteção.

Saídas forçadas múltiplas associadas compreendem a saída forçada superposta de vários compo

entes, em que não se verifica a condição de in dependência. Há duas sub-categorias:

a) Múltiplas Dependentes

Descrevem as indisponibilidades forçadas su perpostas de vários componentes, em que uma ou mais saídas são consequência da ocorrên cia prévia de outras, designadas "primá rias". As saídas consequentes são designadas "secundárias" |21|.

Estas falhas são conhecidas como FALHAS EM CADEIA e não são normalmente incluídas em avaliações de confiabilidade de sistemas com postos, pois exigem aquisição de dados do sistema em adição a dados de componentes in dividuais |11|.

Estas saídas são de grande risco para o sis tema, durante períodos de transições climáti cas acentuadas |10|.

b) Múltiplas de Modo Comum

São eventos tendo uma causa externa com múl tiplos efeitos de falha, em que estes efeitos não são consequência um do outro |20|.

Exemplos dessas falhas incluem componentes separados, contendo o mesmo erro de projeto, dependência não identificada, de componentes redundantes a um elemento único, erros huma nos sistemáticos, saídas em equipamentos

acompanhados de falhas do sistema de proteção e controle, como: disjuntor preso, curto em barra, etc.

2 - Saídas Programadas

As saídas programadas não causam falha de suprimento, mas sendo elas associadas a saídas forçadas, agravam as suas conseqüências.

Nas duas últimas seções deste Capítulo serão apresentados os Modelos de Markov e Poisson, para no Capítulo que se segue, aplicá-los à confiabilidade do Sistema de Distribuição, fornecendo os parâmetros probabilísticos, referentes ao modelo de falha no sistema composto.

2.2.3 - Função de Densidade de Falha, Taxa de Falha e Função Distribuição

2.2.3.1 - Função de Densidade de Falha

Sendo N componentes colocados em operação no tempo $t = 0$, no tempo t , o número de sobreviventes é $n(t)$. A função densidade de falha, definida no intervalo de t_i a $t_i + \Delta t$ é dada pela razão entre o número de falhas que ocorre e o tamanho da população original dividido pelo tamanho do intervalo de tempo [18].

$$fd(t) = \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t)]/N}{\Delta t} \quad (2.1)$$

2.2.3.2 - Taxa de Falha

A taxa de falha, no mesmo intervalo, é definida como a razão do número de falhas que ocorrem no intervalo de tempo e o número de sobreviventes no início do intervalo de tempo dividido pelo tamanho do intervalo $|\Delta t|$.

$$Z_d = \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t)] / n(t_i)}{\Delta t} \quad (2.2)$$

A função de densidade de falha $fd(t)$ é uma medida global de velocidade de falhas e a taxa de falha é uma avaliação instantânea da velocidade de falhas.

2.2.3.3 - Função Distribuição de Falha

A partir da função densidade de falha, defini-se a função distribuição como:

$$Fd(t) = \int_0^t fd(\epsilon) d\epsilon \quad (2.3)$$

E obtém-se a função de confiabilidade, dada por:

$$Rd(t) = 1 - Fd(t) = 1 - \int_0^t fd(\epsilon) d\epsilon \quad (2.4)$$

2.3 - Frequência e Duração das Interrupções

O primeiro passo na descrição da confiabilidade e disponibilidade de um determinado sistema ou dispositivo é estabelecer um modelo do processo "OPERAÇÃO-FALHA-REPARO-OPERAÇÃO". Para o fim de análise, o modelo relacionado é o de "substituição" no qual os processos estocásticos de falha e reparo são os mesmos para qualquer ciclo de falha-reparo [11].

2.3.1 - O Ciclo Falha-Reparo, Tempo e Disponibilidade

Considera-se que um componente (equipamento) é observado durante um intervalo de tempo, no qual N ciclos de falha (faltas permanentes) e reparos são anotados. Seja m_1 o tempo observado até a falha, para o primeiro ciclo e r_1 o tempo observado de reparo para a primeira falha, Figura (2.1). Similarmente sejam m_i e r_i , os tempos para falha e reparo para o iésimo ciclo. O ciclo operação-reparo é um processo de substituição e é estatisticamente independente, sendo a distribuição das durações estacionária no tempo. Os valores esperados de m e r são estimados por:

$$m_{\text{médio}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i \quad (2.5)$$

$$r_{\text{médio}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (2.6)$$

O tempo de ciclo médio do processo de falha-reparo é dado pela soma do tempo médio para falha e o tempo médio de reparo.

$$T_{\text{médio}} = m_{\text{médio}} + r_{\text{médio}}$$

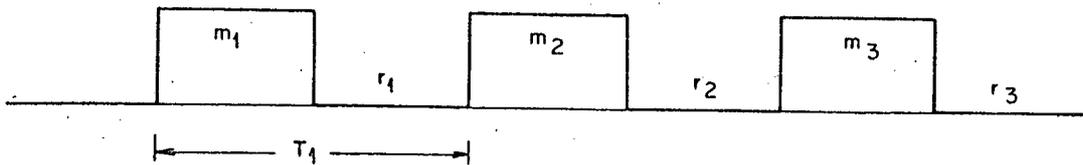


FIGURA 2.1 - Ciclo Falha - Reparo.

A disponibilidade é a fração de tempo em que o equipamento está ligado ou disponível para serviço e é dado pela razão do tempo médio para falha (equipamento em operação), $m_{\text{médio}}$ e o tempo médio do ciclo, $T_{\text{médio}}$:

$$A = \frac{m_{\text{médio}}}{T_{\text{médio}}} = \frac{m_{\text{médio}}}{m_{\text{médio}} + r_{\text{médio}}} \quad (2.7)$$

O complemento da disponibilidade é chamado INDISPONIBILIDADE e é dado por:

$$\bar{A} = 1 - A = \frac{r_{\text{médio}}}{T_{\text{médio}}} \quad (2.8)$$

A frequência de falha, f , é a recíproca do tempo médio do ciclo e é dado por:

$$f = \frac{1}{m_{\text{médio}} + r_{\text{médio}}} = \frac{1}{T_{\text{médio}}} \quad (2.9)$$

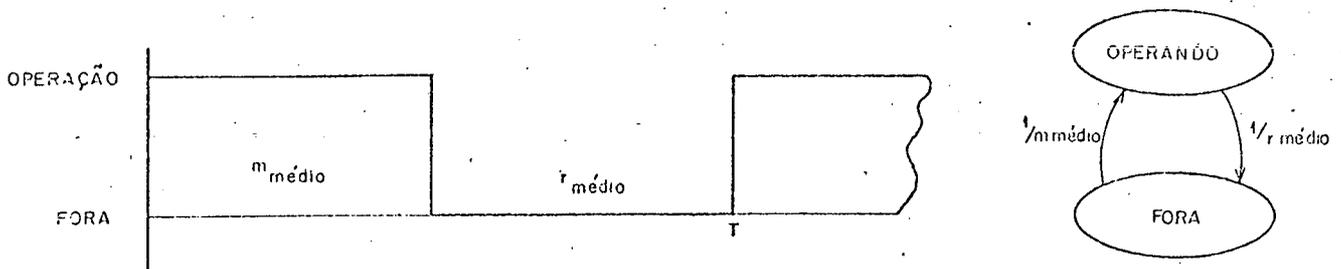


FIGURA 2.2 - Modelo Operação Falha à Dois Estados.

2.3.2 - Componentes Reparáveis em Série

Dois dispositivos estatisticamente independentes estão em serviço ao mesmo tempo e a cada um é associado por um processo de substituição estacionário, com tempos médios para falha m_1 e m_2 e tempos de reparo r_1 e r_2 , conforme Fig. (2.3)

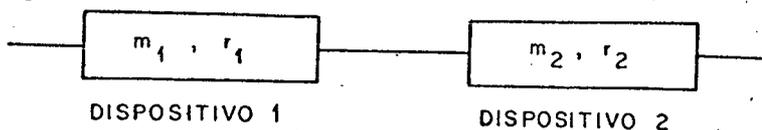


FIGURA 2.3 - Componentes em Série.

A disponibilidade ou probabilidade de sucesso do circuito série, A_s , é dada pelo produto entre a disponibilidade do dispositivo 1 e a disponibilidade do dispositivo 2, e é dada por:

$$A_s = A_1 \cdot A_2 = \frac{m_1}{m_1 + r_1} \cdot \frac{m_2}{m_2 + r_2} \quad (2.10)$$

Um sistema de componentes em série equivale a um sistema que atua de maneira similar à combinação dos dois dispositivos, sendo a disponibilidade do sistema dada por:

$$A_s = \frac{m_s}{m_s + r_s} \quad (2.11)$$

Onde:

m_s - Tempo médio para falha.

r_s - Tempo médio de reparo.

A frequência de falhas do sistema é igual à soma da frequência média do evento componente 1 fora de operação enquanto o componente 2 opera e a frequência do evento componente 2 fora enquanto o 1 opera.

$$f_s = A_2 f_1 + A_1 f_2 = \frac{1}{m_s + r_s} \quad (2.12)$$

A razão de falha de um sistema série é a soma das razões de falha dos componentes e é dada por:

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} = \frac{1}{m_s} \quad (2.13)$$

2.3.3 - Componentes Reparáveis em Paralelo

Sejam dois dispositivos estatisticamente independentes e que podem individualmente atender a carga. Cada um é dirigido por processos fixos de falha e reparo, tais que as distribuições de tempo do dispositivo em baixa ou em operação formam um processo de substituição. O sistema está indisponível quando os dois dispositivos falham [11], conforme Figura (2.4).

O comportamento de um sistema paralelo é essencialmente o dual do sistema série. Como a razão de falha é somada no sistema série, as razões de reparo, inversos dos tempos de falha são somados nos componentes em paralelo para determinar o tempo em baixa do sistema.

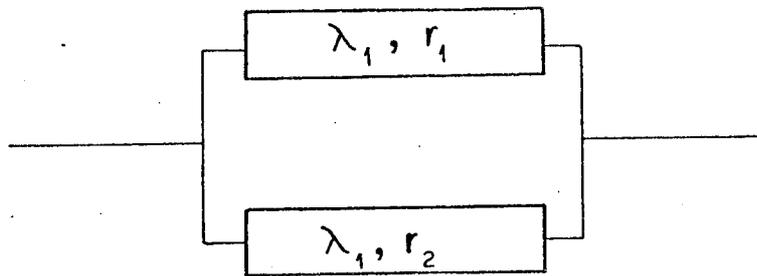


FIGURA 2.4 - Componente em Paralelo.

A indisponibilidade do sistema é dada pelo produto da indisponibilidade do componente 1 e do componente 2.

$$\bar{A}_p = \frac{\lambda_1 \cdot r_1}{(1 + \lambda_1 r_1)} \cdot \frac{\lambda_2 \cdot r_2}{(1 + \lambda_2 r_2)} \quad (2.14)$$

A freqüência de falha do sistema é dada por:

$$f_p = f_1 \bar{A}_2 + f_2 \bar{A}_1 \quad (2.15)$$

$$f_p = \frac{\lambda_1}{(1 + \lambda_1 \cdot r_1)} \cdot \frac{\lambda_2 r_2}{(1 + \lambda_2 r_2)} + \frac{\lambda_2}{1 + \lambda_2 r_2} \cdot \frac{\lambda_1 r_1}{1 + \lambda_1 r_1}$$

$$f_p = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{(1 + \lambda_1 r_1) (1 + \lambda_2 r_2)} \quad (2.16)$$

O tempo médio de reparo é a razão entre indisponibilidade do sistema e freqüência de falha do mesmo e é dado por:

$$r_p = \frac{\bar{A}_p}{f_p} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (2.17)$$

2.3.4 - Eventos Independentes para mais de dois Componentes

2.3.4.1 - Um de Três Componentes do Sistema em Falha

$$P = \bar{A}_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (2.18)$$

$$d = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3}} \quad (2.19)$$

$$f = \frac{P}{d} \quad (2.20)$$

Onde:

P - Probabilidade do sistema estar em operação.

d - Duração das falhas.

f - Freqüência das falhas.

2.3.4.2 - Dois de Três Componentes em Falhas Simultâneas

$$P = \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3 \quad (2.21)$$

$$d = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{m_3}} \quad (2.22)$$

$$f = \frac{P}{d} \quad (2.23)$$

2.4 - Processos de Markov

2.4.1 - Introdução

Um processo estocástico é definido como sendo uma coleção indexada ou ordenada de variáveis casuais ou aleatórias $\{X_t\}$ que variam de modo imprevisível. O índice t é um conjunto de números inteiros não negativos e X_t representa uma quantidade mensurável ou uma característica quantificável que possa ser de interesse ao fim do tempo t .

Um exemplo de processo estocástico é descrito por uma dada experiência, ensaio ou observação, que se realiza em diversos estágios e onde os seus possíveis resultados não possam ser

conhecidos com exatidão |4|.

Existem vários fenômenos e situações que podem ser analisados através da utilização de processos estocásticos. Em estudos de Confiabilidade de Sistemas Elétricos, o comportamento de um conjunto de componentes que estejam em operação, durante um certo período de tempo leva à consideração e análise de processos estocásticos descritos a seguir:

Em dados instantes de tempo $t = 0, 1, 2, 3 \dots$, o componente ou sistema em observação, pode ser encontrado exatamente em um dos números finitos de estados mutuamente exclusivos. Sendo $M + 1$ os estados possíveis, faz-se corresponder a cada um deles, um dos números compreendidos entre 0 e M ; estes números constituem, assim, uma caracterização conveniente desses estados.

Há dois tipos de parâmetros, utilizados no processo estocástico:

a) Parâmetros Contínuos:

A medição é feita, continuamente, no intervalo de tempo t .

b) Parâmetros Discretos:

As observações são feitas em determinados intervalos de tempo.

Os processos estocásticos se dividem em dependentes e independentes.

O processo estocástico dependente fica completamente definido, quando forem conhecidas ou determinadas as funções de distribuições conjuntas das variáveis aleatórias envolvidas, sen

do os resultados obtidos ao fim de um dado estágio dependentes dos resultados obtidos em estágios anteriores. Assim:

$$P \{X_n = i / X_{n-1} = j, X_{n-2} = k, \dots, X_0 = m\} \quad (2.24)$$

O processo estocástico independente corresponde à situação em que o resultado da experiência ao fim de um certo estágio de realização pode ser considerado completamente independente do histórico passado e presente do processo, isto é:

$$P \{X_n = i / X_{n-1} = j, X_{n-2} = k, \dots, X_0 = m\} = P \{X_n = i\} \quad (2.25)$$

Uma particularização do processo dependente permite considerar que o resultado da experiência ao fim de um certo estágio depende somente do resultado da experiência no estágio imediatamente anterior, sendo independente dos resultados de outros estágios de realização.

$$P \{X_n = i / X_{n-1} = j, X_{n-2} = k \dots X_0 = m\} = P \{X_n = i / X_{n-1} = j\} \quad (2.26)$$

Esta condição é conhecida como Propriedade de Markov. Os processos estocásticos, que obedecem a esta equação, são designados como processos sem memória, pois em um processo estocástico, o conhecimento do resultado do último estágio permite prever o comportamento futuro do processo, sem necessidade de nenhuma outra informação sobre seu comportamento passado. Esta afirmação só é válida se o resultado da experiência no último estágio for conhecida.

As probabilidades da forma $P\{X_n = i / X_{n-1} = j\}$ são

denominadas PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO.

2.4.2 - Espaço de Estado

Um componente ou sistema pode assumir vários estados, dependendo de seu modo de falha e reparo. O estado de um sistema é definido pela descrição do estado de seus componentes e das condições ambientais, em que o sistema está operando [21].

Espaço de estado é o conjunto de todos possíveis estados do sistema. Um estado do sistema representa, portanto, uma particular condição, onde cada componente se encontra em uma condição operativa específica: em operação, em manutenção, falhado ou em qualquer outra condição de relevância para o tipo de análise a se realizar. Se o estado de qualquer dos componentes e/ou as condições ambientais variam, o sistema passa para outro estado. Para visualizar o espaço de estado, utiliza-se o diagrama de espaço de estado, Figura 2.5.

Em uma cadeia finita de Markov, diz-se que um estado j é acessível a partir de um outro estado i , se existir um número inteiro n , tal que $P_{ij}^{(n)} > 0$, onde P_{ij}^n representa a probabilidade de um processo passar do estado i para o estado j ao fim de n estágios.

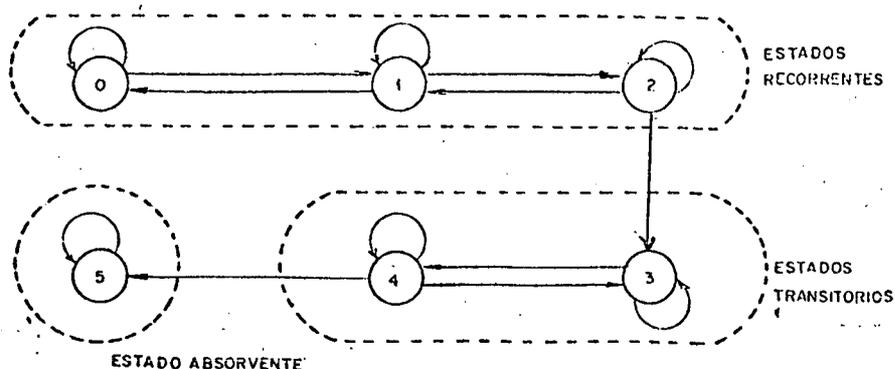


FIGURA 2.5 - Tipo de Estados.

2.4.3 - Aplicação de Markov Para Vários Estados

Um sistema S é caracterizado por um conjunto de estados discretos exaustivos e mutuamente exclusivos $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ em um tempo qualquer, sendo:

$P_i(t)$ - Probabilidade do sistema estar em um estado S_i no tempo t .

ρ_{ij} - Taxa de saída do estado S_i para o estado S_j .

$\rho_{ij} \cdot \Delta t$ - Probabilidade de transição do estado S_i para o estado S_j em um intervalo de tempo Δt .

Deste modo, as probabilidades de encontrar um sistema de n estados, em qualquer estado S_i , num tempo $t + \Delta t$ é escrita por n equações simultâneas em função de $P_i(t)$.

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) \cdot \left[1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} \cdot \Delta t \right] + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_j(t) \rho_{ji} \cdot \Delta t \quad (2.28)$$

Probabilidade do sistema não sair do estado S_i no intervalo de t a $t + \Delta t$.

Probabilidade do sistema estar no estado S_j no tempo t e mover para S_i em $t + \Delta t$.

Desenvolvendo a equação:

$$P_i(t + \Delta t) - P_i(t) = - P_i(t) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} \Delta t + P_j(t) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ji} \Delta t$$

Dividindo por Δt :

$$\frac{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = -P_i(t) \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} + P_j(t) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \rho_{ji}$$

Como $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{X(t + \Delta t) - X(t)}{\Delta t} = \dot{X}$, quando $t \rightarrow 0$, $\Delta t \rightarrow 0$ a equação

torna-se:

$$\dot{P}_i(t) = -P_i(t) \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} + P_j(t) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{ij} \quad (2.29)$$

O conjunto de equações acima pode ser, simbolicamente escrito por:

$$\dot{P} = A \cdot P \quad (2.30)$$

Onde:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -\sum_{j=2}^n \rho_{1j} & \rho_{21} & \dots & \rho_{n1} \\ \rho_{12} & -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_{2j} & \dots & \rho_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1n} & \rho_{2n} & \dots & -\sum_{j=1}^{n-1} \rho_{nj} \end{bmatrix}$$

para $i = 1, 2, 3, \dots, n$

A probabilidade de falha é calculada por:

$$P_F = \sum_{i \in F} P_i \quad (2.31)$$

sendo F o conjunto de estados de falha.

A freqüência de falha é dada por:

$$f_F = \left(\sum_{i \in F} P_i \right) \cdot \left(\sum_{\substack{j \in w \\ j \notin F}} \rho_{ij} \right) \quad (2.32)$$

Onde:

w - Conjunto de estados em operação.

ρ_{ij} - Taxa de transição do estado i para o estado j .

Observação:

A probabilidade de ocorrer mais de uma mudança de estado durante um intervalo de tempo infinitesimal é considerada desprezível.

2.4.4 - Processos Contínuos de Markov

A teoria do processo de Markov é aplicada em confiabilidade em sistemas discretos no espaço e contínuos no tempo.

Analisando o caso particular de um simples componente, tem-se:

$P_0(t)$ - Probabilidade do componente ser operável no tempo t .

$P_1(t)$ - Probabilidade do componente estar falho no tempo t .

Os processos de falha e reparo são, geralmente, caracterizados por distribuições exponenciais. Outras distribuições podem ser utilizadas através das taxas de transição médias.

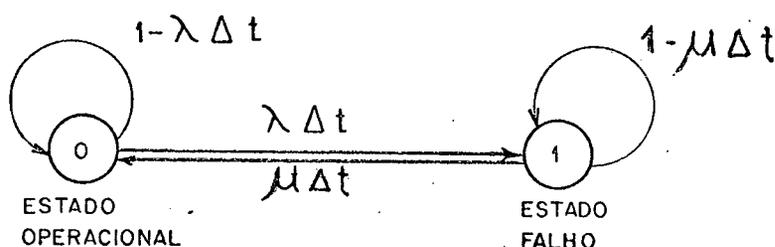


FIGURA 2.6 - Transição de um Estado Operacional para um Estado Falho.

A razão da probabilidade de transição do estado operacional para o estado falho é a taxa de falha λ . (Fig. 2.6).

Observação:

1 - O estado falho é um estado não absorvente já que se pode sair dele.

2 - A soma das probabilidades saindo de um nó é 1.

3 - A probabilidade de estar em um nó no instante

$t + \Delta t$ é a soma das probabilidades que chegam àquele nó.

As equações que regem o sistema da Figura 2.6 são:

$$\begin{aligned} \dot{P}_0(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \dot{P}_1(t) &= \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \end{aligned} \quad (2.33)$$

A solução deste modelo, caracterizado pela distribuição exponencial, é:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \\ P_1(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Em regime permanente, os valores das equações acima são dados por:

$$P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}, \quad P_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}$$

Em sistemas mais complicados, a dificuldade cresce para obter uma expressão geral dependente do tempo.

As probabilidades de residência nos estados em regime permanente são obtidas pela conversão das equações algébricas, através da anulação do vetor de derivadas \dot{P} e da substituição de uma equação do sistema pela equação de balanço das probabilidades: $P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = 1$.

2.4.5 - Exemplos de Soluções do Processo Contínuo de Markov

2.4.5.1 - Solução em Regime Permanente

Para exemplificar a solução em regime permanente, utiliza-se o modelo de flutuação de condições pré-determinadas a dois estados (operação e falha) ao qual se acopla o modelo de flutuações de condições de tempo a dois estados, ou seja, tempo bom e tempo adverso. Supondo que as distribuições relativas a essas condições meteorológicas sejam normais, definem-se as taxas médias de transição para dado sistema e monta-se o diagrama de Markov correspondente Figura 2.7.

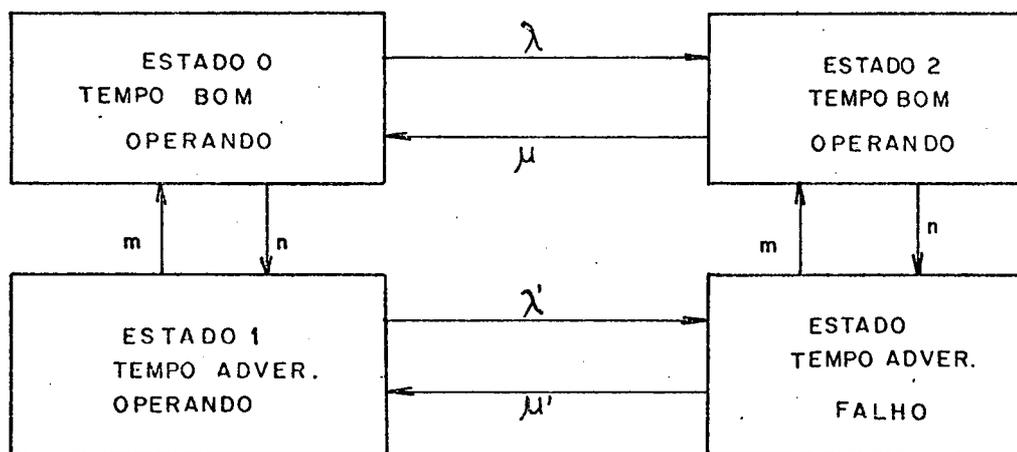


FIGURA 2.7 - Diagrama de Espaço de Estados.

Os parâmetros definem-se como:

λ - Taxa de falha do componente em condições de tempo normal.

μ - Taxa de reparo do componente em condições de tempo normal.

λ' - Taxa de falha do componente em condições de tempo adverso.

μ' - Taxa de reparo do componente em condições de tempo adverso.

$S = \frac{1}{m}$ - Duração esperada de tempo adverso.

$N = \frac{1}{n}$ - Duração esperada de tempo bom.

A equação matricial que rege este processo é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_0(t) \\ \dot{P}_1(t) \\ \dot{P}_2(t) \\ \dot{P}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda + n) & m & \mu & 0 \\ n & -(m + \lambda') & 0 & \mu' \\ \lambda & 0 & -(\mu + n) & m \\ 0 & \lambda' & n & -(\mu' + m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

As probabilidades dos quatro estados em regime permanente podem ser obtidas por:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda + n) & m & \mu & 0 \\ n & -(m + \lambda') & 0 & \mu' \\ \lambda & 0 & -(\mu + n) & m \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

A probabilidade de encontrar o sistema operando é $P_{up} = P_0 + P_1$.

Explicitando P_{up} em função dos parâmetros de transição, supondo que a taxa de reparo seja idêntica em tempo bom e tempo adverso, tem-se:

$$P_{up} = \frac{\mu}{m + n} \left[\frac{(m + n)^2 + m(\mu + \lambda') + n(\mu + \lambda)}{(\mu + \lambda) \cdot (\mu + \lambda') + m(\mu + \lambda) + n(\mu + \lambda')} \right]$$

Em grandes sistemas, considerando os dois estados ambientais, o Processo de Markov requer a solução numérica do sistema de equações lineares em regime permanente. Há técnicas que evitam a grande dimensionalidade de formulação completa do processo de Markov.

2.4.5.2 - Solução em Regime Transitório

O método utilizado para regime transitório é a resolução de equações diferenciais ordinárias.

Este trabalho utiliza o Método de Runge-Kutta, integração por partes.

O Método de Runge-Kutta é um método de integração numérica multivariável com o passo de integração escolhido conve

nientemente em função dos fenômenos transitórios.

Este método resolve equações diferenciais de ordem n , decompostas em equações de primeira ordem. O algoritmo de Runge-Kutta é definido como:

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{h}{6} (K_0 + 2K_1 + 2K_2 + K_3), i = 0, 1, 2 \dots n,$$

onde:

$$K_0 = f(t_i, Y_i)$$

$$K_1 = f(t_i + h/2, Y_i + K_0/2 \cdot h)$$

$$K_2 = f(t_i + h/2, Y_i + K_1/2 \cdot h)$$

$$K_3 = f(t_i + h, Y_i + K_2) \quad (2.35)$$

As soluções do processo de Markov são combinações de funções exponenciais decrescentes.

Para estimar, aproximadamente, o passo de integração, procura-se o valor da MENOR constante de tempo das funções $e^{-\lambda t}$ em estudo, definida como $1/\lambda$. O passo da integração deverá ser uma fração do valor encontrado.

Outro tipo de solução em regime transitório para o processo de Markov é o resultado da expansão de e^{-At} . O processo é desenvolvido da seguinte maneira:

Dado o sistema de equações diferenciais:

$$\dot{P} = A P, \text{ sua solução é } P = e^{-At}.$$

Expandindo este resultado em série obtém-se:

$$P = \left[I + At + \frac{A^2 t^2}{2!} + \frac{A^3 t^3}{3!} + \dots P_0 \right] \quad (2.36)$$

Desprezando os termos de ordem superior à unidade, a equação torna-se:

$$P_1 \approx [I + A] P_0, \quad t = 1$$

$$P_2 \approx [I + A] P_1$$

.

.

.

$$P_{K+1} \approx [I + A] P_K$$

Donde se conclui que:

$$P_{K+1} \approx [I + A]^{K+1} P_0 \quad (2.37)$$

A matriz $I + A$ é a matriz de transição estocástica.

Este modelo torna-se inviável, se o sistema for muito grande, face à multiplicação sucessiva de matrizes que o sistema requer para atingir o regime permanente. É usado para obter algumas soluções em regime transitório.

A precisão deste método requer unidades de tempo inferiores às menores constantes de tempo do problema.

Uma outra forma de obter a resolução de equações diferenciais é através do cálculo de autovalores e autovetores da matriz de transição.

2.5 - Processo de Poisson

Ocorrências de falhas em subsistemas de distribuição formam um processo estocástico [14]. Considerando que normalmente o tempo de reparo ou restauração das falhas é bem inferior ao tempo para falhas e que o número de componentes sujeitos a falha é bastante elevado, o processo estocástico assim resultante se aproxima do processo de Poisson, no qual a probabilidade de terem ocorrido K falhas até o instante t é obtido por:

$$P_K = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^K}{K!} \quad (2.38)$$

Onde λ é a taxa média de ocorrência de qualquer falha no sub-sistema considerado. A Figura 2.8 ilustra o processo:

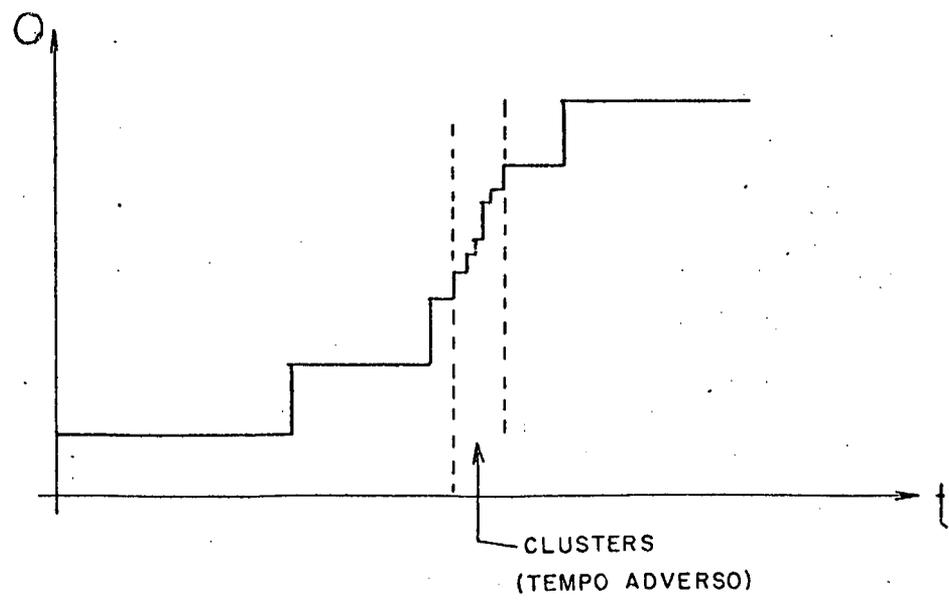


FIGURA 2.8 - Processo de Poisson.

Considerando a existência de maior incidência de falhas em períodos de tempo adverso, o que pode ser observado pelos cálculos das taxas de falha em tempo bom (λ_N) e em tempo adverso (λ_S), o processo de ocorrências de falha evidencia o fenômeno de "CLUSTERING" ou aglutinação de falhas durante os períodos de tempo adverso (Figura 2.8).

Nessas condições, o processo estocástico não segue propriamente as regras do processo de Poisson, mas poderia ser de composto em dois processos de Poisson, um somente com ocorrências em tempo bom e outro com tempo adverso.

A avaliação do processo de Poisson é efetuada pelo teste de aderência da função de distribuição de probabilidade exponencial, já que esta é um caso particular de Poisson para $K = \emptyset$, ou seja, quando houver nenhuma ocorrência de falha.

2.6 - Considerações Finais

Neste Capítulo foram descritas metodologias que são utilizadas na análise de confiabilidade do Sistema de Distribuição.

Uma análise detalhada de falhas foi feita, conceituando a falha e descrevendo os modos de falha.

Foram identificados os tempos para falha e tempo de reparo numa análise de duração e freqüência das interrupções.

O processo de Markov, um processo estocástico e que foi utilizado para cálculos de probabilidade de permanência nos estados é conceituado e são apresentados métodos de solução para seu cálculo.

Também foi apresentado o processo de Poisson, que é utilizado para caracterizar as ocorrências de falhas em tempo considerado bom e adverso.

C A P Í T U L O I I I

CONFABILIDADE NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO3.1 - Introdução

O sistema de distribuição de energia elétrica é composto por circuitos de subtransmissão, subestações de distribuição, alimentadores primários, transformadores de distribuição e conexões de consumidores. Este sistema é considerado como elo final entre o consumidor e o sistema de potência. A ligação pode ser radial e conseqüentemente susceptível a saídas devido a eventos únicos [16].

É constatado que 80% de todas as interrupções ocorrem devido a falhas no sistema de distribuição que resultam usualmente em interrupções em consumidores, causando distúrbios apenas locais, graças à ação da proteção instalada a montante.

A confiabilidade em Sistemas de Distribuição pode ser medida através de taxas, ditas de rendimento do sistema. Este tipo de medida envolve uma coleção de dados de falhas do mesmo.

Os métodos analíticos diretos usam dados de saídas dos componentes para cálculo dos índices de confiabilidade da rede. Há no mínimo 3 índices que são necessários para descrever a confiabilidade associada a um ponto particular de carga. Eles são frequência de falha, duração média de saída e total de horas médias de saída do sistema por ano, e podem ser calculados através do número de consumidores atingidos pela interrupção ou pela potência instalada atingida na interrupção.

Este capítulo descreve a classificação das interrupções em Sistemas de Distribuição; os índices de desempenho da confiabilidade, um estudo sobre os reparos no sistema, apresentando um algoritmo de determinação de turmas baseado no teoria de filas sugerido na bibliografia do setor.

Por último, apresenta um outro enfoque para este problema através de um modelo Markoviano com limitação no número de turmas para reparo, o qual é exemplificado neste trabalho.

3.2 - Classificação das Interrupções na Distribuição de Energia

A interrupção é classificada em cinco itens que são |12|:

- a) Duração
- b) Origem
- c) Causa
- d) Tensão de serviço
- e) Condições climáticas

Sua classificação, segundo a DURAÇÃO:

- a) Momentânea (interrupção menor que 3 minutos, por exemplo).
- b) Sustentada.

Segundo a ORIGEM, a interrupção é classificada como:

- a) Externa ao sistema considerado.
- b) Interna ao sistema.

Sua classificação, segundo a CAUSA é:

- a) Programada
 - Alteração
 - Construção
 - Manutenção
- b) Não Programada
 - Causada por uma saída forçada do equipamento e é devida à ação do meio ambiente, de terceiros, falha humana, falha de componentes, ação própria do sistema, etc..

Segundo a TENSÃO DE SERVIÇO, a interrupção é dividida em:

- a) Subtransmissão (maior que 34 KV)
- b) Primária (de 6.6 KV até 22 KV)
- c) Secundária (115, 127, 220, 230 e 380 V)

Segundo o CLIMA, a interrupção pode ocorrer em:

- a) Tempo Normal
- b) Tempo Adverso, havendo possibilidade de subdivisão da classificação de clima adverso.

3.3 - Índices de Desempenho de Confiabilidade

A quantificação do desempenho dos sistemas de distribuição é feita através do cálculo dos índices operativos, que são medidas de confiabilidade ponderadas em relação aos consumidores.

res ou às potências instaladas |12|.

Estes índices são calculados de acordo com a necessidade, segundo os mais diversos objetivos do sistema e fornecem índices de qualidade do serviço ao consumidor e a confiabilidade do Sistema Elétrico, em base de critérios de continuidade de serviço e métodos probabilísticos de estudos de confiabilidade em sistemas de distribuição de energia |16|.

3.3.1 - Duração Equivalente por Consumidor (DEC)

É o período de tempo que, em média, cada consumidor do sistema ficou privado do fornecimento de energia elétrica, no período considerado |12|.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i) \cdot t(i)}{C_s} \quad (3.1)$$

Onde:

- D - Duração equivalente por consumidor (horas).
- $C_a(i)$ - Número de consumidores atingidos na interrupção (i).
- $t(i)$ - Tempo decorrido na interrupção (i).
- C_s - Número total de consumidores do sistema.
- i - Número da interrupção, variando de 1 a n.

3.3.2 - Duração Equivalente por Potência Instalada

É o período de tempo que, em média, cada unidade de potência instalada (KVA ou MVA) do sistema ficou desenergizada no período considerado.

$$D_K = \frac{\sum_{i=1}^n P(i) \cdot t(i)}{P_{Total}} \quad (3.2)$$

Onde:

- D_K - Duração equivalente por potência instalada.
- $P(i)$ - Potência instalada atingida na interrupção i , expressa em KVA ou MVA.
- $t(i)$ - Tempo decorrido na interrupção (i) (horas).
- P_{Total} - Potência total instalada no sistema em KVA ou MVA.
- i - Número de interrupção, variando de 1 a n .

3.3.3 - Duração Média por Consumidor

É o período de tempo que, em média, cada consumidor atingido ficou privado do fornecimento de energia elétrica no período considerado:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i) \cdot t(i)}{\sum_{i=1}^n C_a(i)} \quad (3.3)$$

d - Duração média por consumidores (horas).

3.3.4 - Duração Média por Potência Instalada

É o período de tempo que, em média, cada unidade de potência instalada atingida ficou desenergizada, no período considerado:

$$d_K = \frac{\sum_{i=1}^n P(i) \cdot t(i)}{\sum_{i=1}^n P(i)} \text{ horas} \quad (3.4)$$

3.3.5 - Frequência Equivalente por Consumidor (FEC)

É o número de interrupções que, em média, cada consumidor do sistema sofreu no período considerado:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i)}{C_s} \quad (3.5)$$

3.3.6 - Frequência Equivalente por Potência Instalada

É o número de interrupções que, em média, cada unidade de potência instalada sofreu no período considerado:

$$f_K = \frac{\sum_{i=1}^n P(i)}{P_{\text{Total}}} \quad (3.6)$$

3.3.7 - Disponibilidade Equivalente por Consumidor

É a razão, por consumidor, em que o sistema ficou no estado operável no período considerado:

$$A = \frac{C_s T - \sum_{i=1}^n C_a(i) \cdot t(i)}{C_s T}$$

$$A = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i) \cdot t(i)}{C_s T}$$

$$A = 1 - \frac{D}{T} \quad (3.7)$$

Onde:

A - Índice de confiabilidade por consumidores

T - Período considerado.

3.3.8 - Disponibilidade Equivalente por Potência

É a razão, por potência, que o sistema ficou no estado operável, no período considerado:

$$A_K = \frac{P_S \cdot T - \sum_{i=1}^n P(i) \cdot t(i)}{P_S \cdot T}$$

$$A_K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P(i) t(i)}{P_S \cdot T} \quad (3.8)$$

3.3.9 - Exemplos Numéricos de Índices de Confiabilidade

A Tabela apresenta dados globais anuais de uma da concessionária.

INDICE \ ANO	1978	1979
DEC (h/ano-consumidor)	1,52	3,36
d (h/ano consumidor afetado)	1,13	1,24
FEC (Interrupções/ano-consumidor)	2,98	2,71
A	0,999598	0,999617

Os valores máximos dos índices DEC e FEC exigidos atualmente por Portaria do DNAEE (Departamento Nacional de Águas Energia Elétrica) são variáveis de acordo com o tipo de atendimento ao consumidor, se em tensão de subtransmissão, primária

ria e secundária, alimentação aérea, subterrânea e tamanho de conjunto de consumidores. Por exemplo, um conjunto de mais de 50.000 consumidores atendidos por sistema aéreo, o valor do DEC não deve ser superior a 30 horas/ano-consumidor, enquanto que a frequência (FEC) não deve ser superior a 45 interrupções/ano-consumidor.

3.4 - Reparos no Sistema de Distribuição

3.4.1 - Introdução

A operação de um Sistema de Distribuição visa manter os consumidores abastecidos de energia elétrica, segundo padrões adequados de continuidade, qualidade e economicidade. Para isso as empresas concessionárias de energia elétrica devem ter uma estrutura que lhes permita operar o sistema, enfrentando operações rotineiras como manobras ou manutenções. Paralelamente a isso, as falhas ocorridas devem ser detectadas e corrigidas no menor tempo possível, para que os índices de desempenho do sistema sejam mantidos [13].

Nesta seção será descrito o controle e a operação de um sistema de distribuição, definindo as prioridades para restabelecer o sistema, quando ocorre uma interrupção. A seguir será apresentada uma metodologia de dimensionamento das turmas para execução dos serviços de pronto restabelecimento do sistema.

3.4.2 - Controle e Operação do Sistema de Distribuição

Quando ocorrem interrupções no sistema é necessário estabelecer critérios que permitam uma estratégia de atendimento

definindo prioridades no restabelecimento do sistema. Usa-se a seguinte escala de prioridades quanto aos componentes do sistema afetado e à natureza de falha |13|:

- PRIORIDADE 1 - Casos de risco iminente de perda de vida humana.
- PRIORIDADE 2 - Tronco do alimentador primário ou linha de distribuição.
- PRIORIDADE 3 - Ramal Primário.
- PRIORIDADE 4 - Falha em equipamento de transformadores.
- PRIORIDADE 5 - Falha na rede secundária.
- PRIORIDADE 6 - Falha em ramal ou circuito de iluminação.

Os consumidores devem ser classificados de acordo com a modalidade de seus equipamentos e de sua vulnerabilidade ao desligamento. Esta classificação auxiliará a tomada de decisão final, quando ocorrem interrupções eventuais programadas e não programadas, fazendo com que a restauração do sistema seja de forma seletiva.

Para que os Centros de Operação de Distribuição possam se orientar quanto à seqüência do restabelecimento da energia, há uma escala de prioridades no atendimento aos consumidores. Esta escala considera a dependência dos processos de produção e atividade dos consumidores e os índices de confiabilidade em termos de continuidade de fornecimento de energia.

O controle do sistema deve ser o mais confiável

possível, pois o acúmulo de interrupções programadas ou não, reflete-se negativamente no conceito que o público faz da concessionária, além de provocar prejuízos financeiros ou sociais irreparáveis. Caberá ao COD (Centro de Operação de Distribuição), a responsabilidade de procurar reduzir ao mínimo as interrupções e, conseqüentemente, atenuar suas conseqüências mediante a utilização de um planejamento operativo racional e normas de procedimento adequadas |13|.

Ao planejar uma manobra ou uma interrupção, programada ou não, os aspectos abordados são:

- a) recursos operativos disponíveis (interligações) no sistema a fim de minimizar o trecho afetado pela falha;
- b) duração, horário e conveniência do desligamento;
- c) segurança das manobras;
- d) importância, tipo e classificação dos consumidores que sofreram interrupções;
- e) necessidade de emissão de avisos aos consumidores;
- f) conveniência da utilização de geradores de emergência da concessionária destinados aos consumidores com prioridade de atendimento;
- g) conseqüências da interrupção.

3.4.3 - Dimensionamento de Turmas para Reparo no Sistema

Na execução dos serviços pelas turmas de emergência, a finalidade é promover pronto restabelecimento do serviço, bem como das condições de segurança humana e das instalações, reduzindo ao máximo as conseqüências de uma falha do material, do equipamento ou do sistema, de forma a atender prontamente ao consumidor.

O número de turmas cresce proporcionalmente ao tamanho do sistema, podendo-se inclusive, agrupar várias turmas para serviços pesados.

Para cada serviço a ser executado deve haver uma equipe, um tempo gasto e um veículo a ser usado. Na maior parte dos serviços a equipe é composta por duas pessoas.

Além das tarefas típicas de manutenção, as turmas de emergência atendem a reclamações particulares de consumidores, orientando-os em sua eliminação.

3.4.4 - Determinação do Número de Turmas

Não há critérios fixos para determinação do número de turmas de manutenção nas empresas concessionárias de energia elétrica. A determinação desse número é feita atualmente de forma empírica, conforme a sensibilidade de administradores e critérios subjetivos.

O regime de funcionamento das turmas de emergência possui características que se enquadram no método estatístico denominado Teoria de Filas. Há dois modelos baseados nessa teoria, utilizando a formulação direta e simulação de dados.

O número de turmas, estabelecido por esses critérios

rios, deve ser considerado como estimativa, sendo uma diretriz para escolha, não eliminando a experiência e conhecimento acumulados no tempo, pelos técnicos [13].

a) Modelos Sugeridos

O modelo de simulação é utilizado quando o processo não alcança a estabilidade ou quando os transientes são críticos. Um exemplo deste caso é um centro de atendimento que não funciona em tempo integral.

O segundo método, formulação direta, é aplicável quando as condições de atendimento seguem distribuição de Poisson e os tempos de atendimento seguem a distribuição exponencial negativa.

A teoria das filas aplica-se às situações em que há um acúmulo de solicitações se serviço.

O modelo mais utilizado em um centro de atendimento de distribuição é o modelo de formulação direta devido a sua aplicação mais imediata, com os dados obtidos e manipulados facilmente.

b) Aplicação da Teoria das Filas nas Determinação do Número de Turmas

O gráfico a seguir representa uma interrupção para aplicação da TEORIA DAS FILAS.

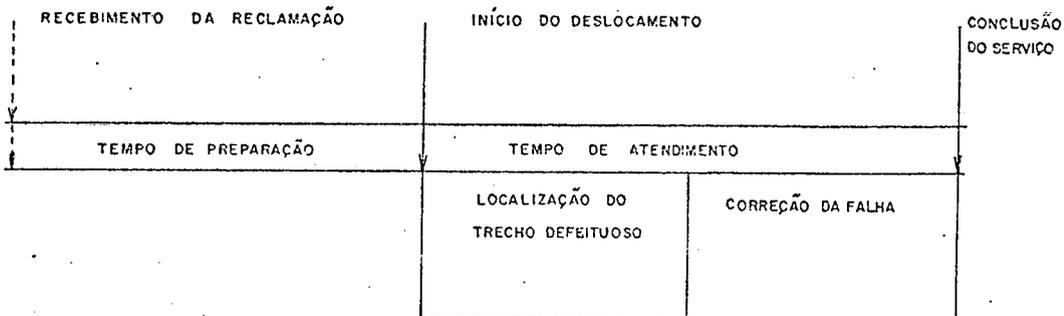


GRÁFICO 3.1 - Preparação para Atender uma Interrupção.

Para aplicação da TEORIA DAS FILAS, os dados necessários são:

- a) Número de atendimentos por hora, por turno e os relativos à emergência.
- b) Tempo de atendimento. ou seja, tempo de localização do trecho defeituoso, mais os tempos de correção da falha para restauração do fornecimento.
- c) Tempo de preparação, ou seja, o tempo de espera para o consumidor, decorrido entre a solicitação ao plantão e o início do deslocamento para atender a ocorrência [13].

$$TP = \frac{C \cdot \left(\frac{D}{C}\right)^S}{(S-1)! (S.C - D)^2} \cdot P_0 ; \text{ Para } S.C > D \quad (3.9)$$

$$P_0 = \frac{1}{\frac{1}{S!} \left(\frac{D}{C}\right)^S \frac{S \cdot C}{S \cdot C - D} + \sum_{N=0}^{S-1} \frac{1}{N!} \left(\frac{D}{C}\right)^N} \quad (3.10)$$

Para uma única turma, as expressões se reduzem a:

$$TP = \frac{D}{C(C - D)}, \text{ para } C > D \quad (3.11)$$

$$P_0 = 1 - \frac{D}{C}, \text{ para } C > D \quad (3.12)$$

Onde:

- TP - Tempo de preparação (tempo médio de espera).
- S - Número de Turmas.
- D - Número médio de atendimentos por hora, por turno.
- C - Capacidade de atendimento por hora, ou seja, número de atendimento por hora que uma turma faz em média.
- P_0 - Probabilidade de que todas as turmas estejam sem serviço a executar ou que não haja ocorrência no sistema.
- N - Número que varia de \emptyset a S-1.

Há tabelas desenvolvidas para indicar o número de turmas, fixando-se determinado tempo de preparação. Para essas tabelas, o tempo de preparação (TP), o número médio de atendimentos (D) e a capacidade de atendimento por hora (C) variam segundo valores usuais nas empresas concessionárias, da seguinte maneira:

- a) TP varia de 5 a 120 minutos.
- b) D varia de 0,04 a 20,0 atendimentos por hora.
- c) C varia de 0,6 a 4 atendimentos por hora.

Se em determinados casos ocorrerem valores fora da variação especificada, calcula-se o número de turmas utilizando as fórmulas (3.9), (3.10), (3.11) e (3.12). O cálculo deve ser por tentativas atribuindo valores a S para se obter o TP desejado, observando a condição de que $S.C > D$.

A seguir é apresentado um exemplo de determinação do número de turmas.

- Cálculo do número de turmas para o turno das 8 às 16 h., do COD da concessionária X.

Dados

- Número total de atendimentos = 852 at/mês.
- Tempo médio de atendimentos = 1.1 h.
- Tempo de preparação = 30 min.

Os dois primeiros dados são coletados dos relatórios mensais e o último é definido pela concessionária.

a) Cálculo do número de atendimentos por hora.

- Total de horas = 8 x 30 dias = 240 horas.

- Número de atendimentos por hora (D) =

$$\frac{\text{Total de atendimentos}}{\text{total de horas}}$$

$$D = \frac{852}{240} = 3.6 \text{ at/h}$$

b) Cálculo da capacidade de atendimentos por hora.

$$C = \frac{1}{\text{tempo médio de atendimentos}}$$

$$C = \frac{1}{1.1} = 0.9 \text{ at/h}$$

c) Obtenção do número de turmas

Sendo o tempo de espera menor ou igual a 30 minutos, utiliza-se a tabela do Número de Turmas (pág. 37 - Manutenção e Operação de Sistemas de Distribuição [13]) e obtém-se o número de turmas, no caso igual a seis.

As tabelas de Número de Turmas foram desenvolvidas para indicar o número de turmas, fixando-se determinado tempo de preparação para cada tabela. Os tempos de preparação fixados são: 5, 15, 30, 60 e 120 minutos.

Caso o tempo de preparação não seja relacionado nessas Tabelas, deve-se calcular por tentativas o número de turmas até obter-se o tempo de preparação indicado.

3.4.5 - Ociosidade das Turmas

Entende-se por OCIOSIDADE, a parcela de tempo em que as turmas de emergência não realizam qualquer serviço, embora estejam à disposição dos consumidores. A ociosidade das turmas independe da vontade de seus integrantes, inerente à sucessão dos eventos, com isso, dificilmente se consegue uma ociosidade menor que 30%, quando se deseja um atendimento dos consumidores em tempos razoáveis.

$$\Psi \% = 100 \cdot \left(1 - \frac{D}{S \cdot C} \right) \quad (3.13)$$

Para uma única turma a expressão reduz-se a:

$$\Psi \% = 100 \cdot \left(1 - \frac{D}{C} \right) \quad (3.14)$$

Onde:

- Ψ % - Ociosidade percentual
- S - Número de turmas
- D - Número de atendimentos por hora.

C - Capacidade de atendimento por hora.

3.5 - Análise da Confiabilidade de Um Sistema Sob Reparos Limitados

3.5.1 - Introdução

A análise da confiabilidade em sistemas quando há restrição ao número de turmas para reparo é muito comum nas concessionárias, atualmente. Uma situação comum é descrita: certos componentes quando falham são designados para um grupo de reparo. Um determinado componente falha, e é reparado, enquanto isto, outro componente falha e, como o grupo está ocupado, esta falha nova forma uma linha de espera [19].

O algoritmo proposto por Billinton [19] deduz equações para taxa média de saída e duração média de saída para duas unidades diferentes sob reparo limitado (somente um grupo de reparo) para operação série e paralelo, usando o método de frequência e duração. O modelo é ilustrado na Figura 3.1.

A técnica desenvolvida neste trabalho, baseia-se na árvore de falha e é descrita na seção 3.5.2.

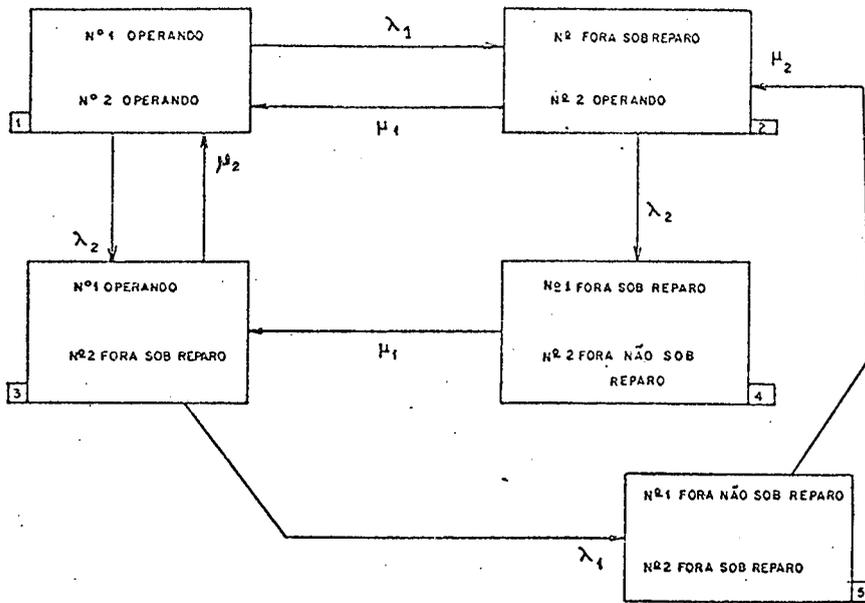


FIGURA 3.1 - Aplicação de Markov aos Reparos Limitados.

3.5.2 - Descrição do Algoritmo Proposto

O modelo é desenvolvido para reparos, baseando-se em vários subsistemas distintos e diferentes tipos de equipes. Os reparos são do tipo irrestrito e restrito, podendo haver uma ou mais equipes de reparo. Há também a possibilidade da equipe ser exclusiva para cada subsistema.

Deve-se levar em conta o número de nível de falha (no caso do exemplo aplicado no Capítulo V, até três), os estados em que há espera e a identificação das transições. Define-se nível de falha como sendo a coletânea de estados de igual número de componentes falhos em todo o sistema.

As taxas utilizadas são as taxas médias de falha e reparo dos subsistemas (λ_i e μ_i).

A estratégia utilizada é a FIFO -, (first in first out), ou seja, a primeira solicitação é a primeira a ser atendida. Tal

estratégia é a mais utilizada na prática a um mesmo nível de prioridade.

As transições se dividem em:

a) Falha

Identificação da árvore de falha pela expansão x^y , onde y é nível de falha e x é o número de subsistemas.

Usa-se a taxa de falha média (λ_i) por subsistema ou unidade e deve-se ter em cada estado os modos de reparo (imediate ou espera).

Exemplo:

Níveis de Falha

- Seja um sistema composto de 2 subsistemas admitindo-se dois níveis de falha além do estado isento de falhas, conforme Figura 3.2, tem-se um total de sete estados, sendo dois idênticos, portanto, agregáveis.

Níveis de	0	1	2
Falha			

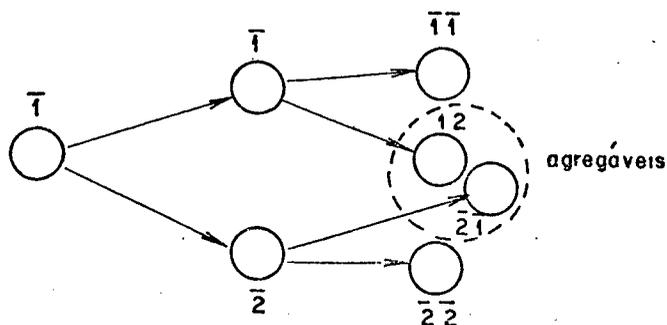


FIGURA 3.2 - Diagrama de Espaço com Estados Agregáveis.

Observação:
- Notação: $\bar{1} \bar{2}$ 0
Estado em que há falha de um componente em cada subsistema (1 e 2).

b) Reparo

As transições reparo podem ser em dois modos, irrestrito e restrito.

1 - Modo Irrestrito

Retorna-se pela árvore de falha com fator de multiplicação da taxa reparo μ_i , conforme o número de elementos a serem reparados no subsistema i , a partir do respectivo estado.

2 - Modo Restrito

Retorna-se a cada estado (agregado ou não) a um dado nível de falha, do nível de falha posterior, obedecendo o seguinte critério:

A transição $k \mu_i$ ocorre sempre quando houver k elementos falhos com reparo imediato no subsistema i . A transição correspondente incide sobre o estado em que restam $k - 1$ falhas do subsistema i , sendo eliminada a mais antiga das k falhas, sem alterar o número de falhas dos demais subsistemas.

Exemplo:

Níveis de Falha 0 . . .

4

5

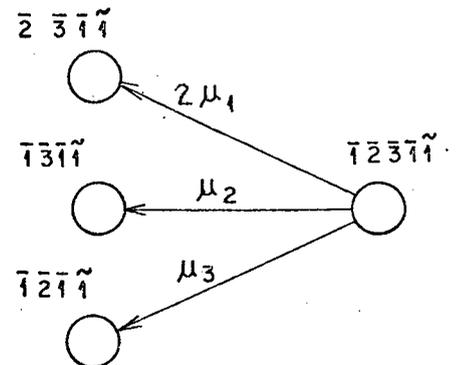


FIGURA 3.3 - Exemplo de Retorno de Transição.

Observação:
- Notação: $\bar{1} \tilde{1}$
0
Hã falha de dois componentes do subsistema (1), sendo o primeiro imediatamente reparável ($\bar{1}$), e segundo em estado de espera ($\tilde{1}$).

3.5.3 - Descrição dos Modos de Reparos

Seja um sistema composto por dois subsistemas que possuem componentes independentes sujeitos a falhas. Cada sistema está sujeito a N falhas e seus componentes podem ser reparados de modo restrito e irrestrito.

a) Reparo Irrestrito

Neste caso não há espera para reparo, ou seja, o nível é sempre nulo, enquanto que o nível de falha varia de 0 a N, sendo N, o número de falhas que o subsistema pode ter ao mesmo tempo. No exemplo apresentado N é limitado em três.

Falha	0	1	2	3
Espera	0	0	0	0

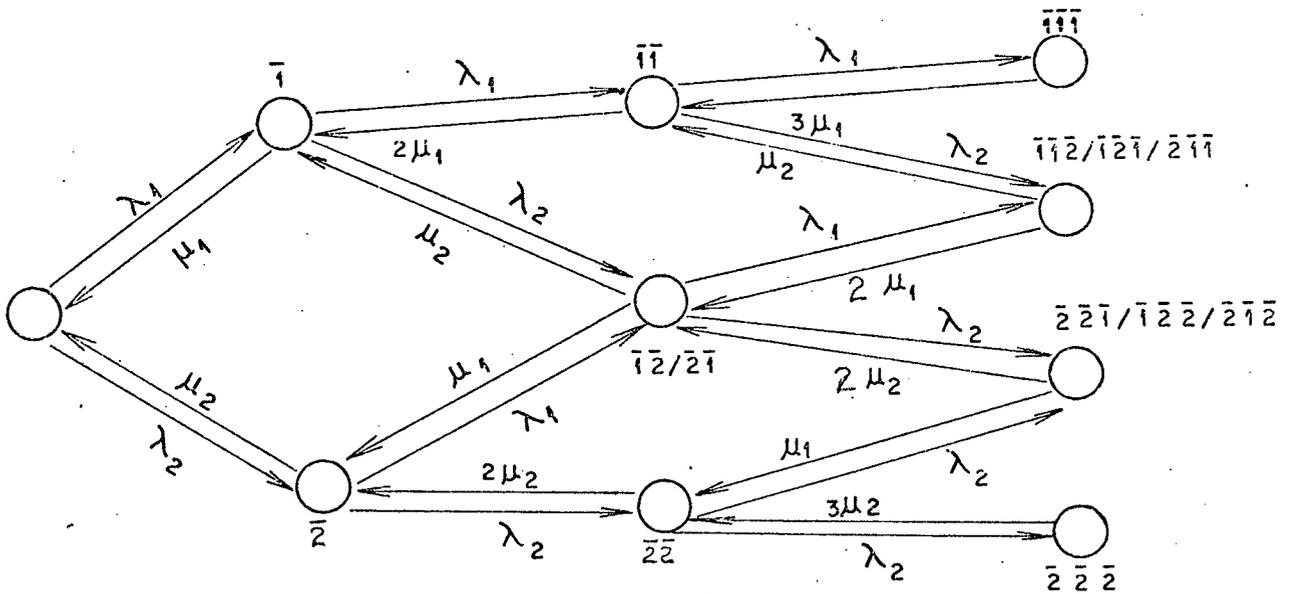


FIGURA 3.4 - Diagrama de Espaço de Estado com reparo Irrestrito.

Analisando o diagrama de espaço de estado verifica-se que o número de turmas para reparo neste modo deve ser no máximo igual ao maior nível de falha considerado no sistema. Caso as taxas de falha e reparo nos subsistemas são semelhantes entre si, ou seja, $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda$ e $\mu_1 \approx \mu_2 \approx \mu$, o modelo se simplifica por agregação de estados como ilustrado abaixo:

Falha	0	1	2	3
Espera	0	0	0	0

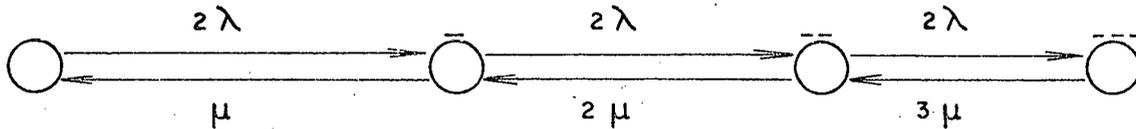


FIGURA 3.5 - Simplificação do Diagrama do Espaço de Estado da Figura 3.4.

Observação:

O superscrito no desenho é definido como:

- Sistema falho, reparo em execução.
- Sistema falho, espera por reparo.

b) Reparo Restrito

b.1) Uma só equipe de reparo, estratégia FIFO

Neste caso, não há equipe para atender todas as interrupções que sofre o sistema em um determinado tempo, e alguns componentes do sistema ficam sob espera. O diagrama de espaço de estado apresentado a seguir ilustra o mesmo sistema exemplo com reparo restrito com uma só equipe.

Nível de Falha	0	1	2	3
Nível de Espera	0	0	1	2

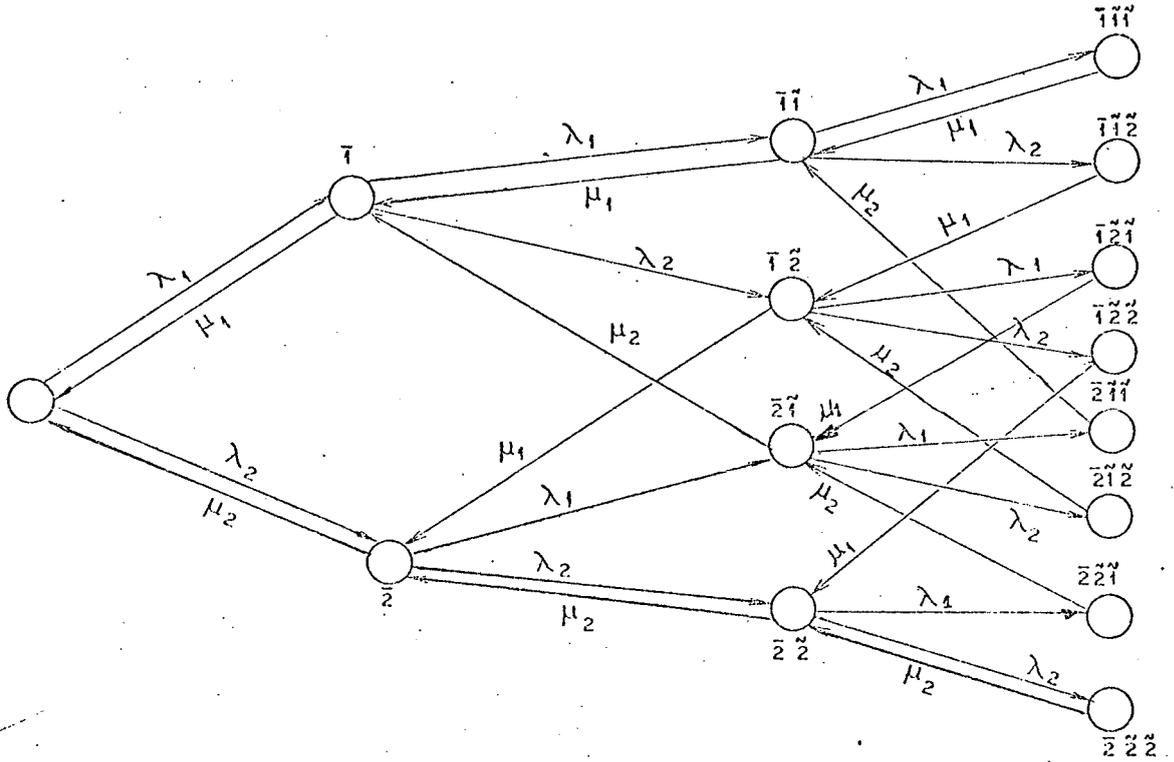


FIGURA 3.6 - Diagrama de Espaço de estado com uma só Equipe de Reparo.

Sendo $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ e $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, o sistema fica simplificado e apresenta-se como:

Nível de Falha	0	1	2	3
Nível de Espera	0	0	1	2

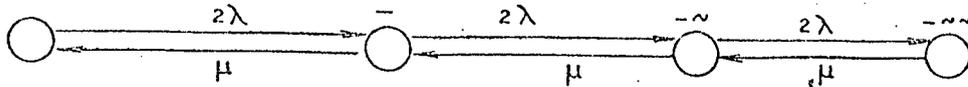


FIGURA 3.7 - Simplificação do Diagrama de Espaço de Estado da Fig. 3.6.

b.2) Duas equipes de reparo, estratégia FIFO

Este modo abrange duas equipes, ambas disponíveis para reparos em qualquer subsistema. Neste caso, sô haverá espera a partir da 3ª nível de falha. O diagrama de espaço de estado é apresentado a seguir:

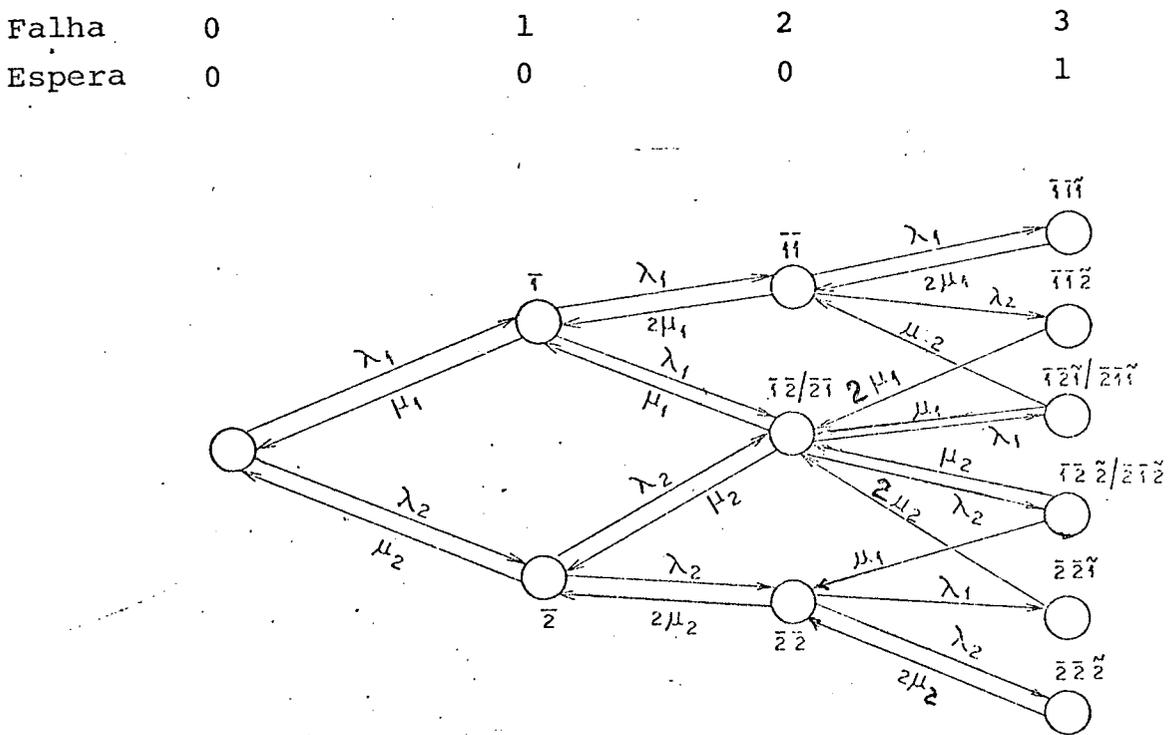


FIGURA - 3.8 - Diagrama de Espaço de Estado com duas Equipes de Reparo.

Quando os subsistemas possuírem as taxas aproximadamente iguais, isto é, $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ e $\mu = \mu_1 = \mu_2$, o modelo simplifica-se e seu diagrama é apresentado da seguinte forma:

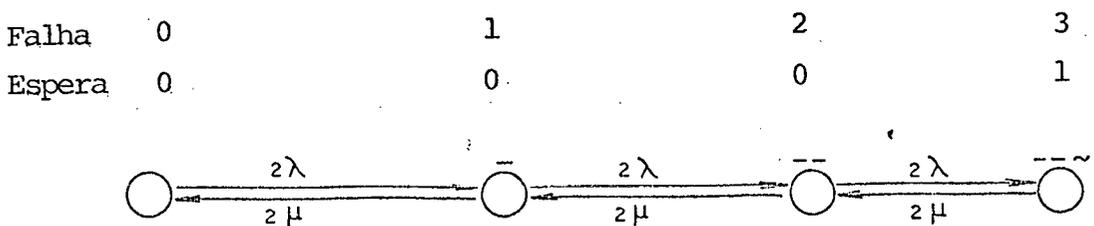


FIGURA 3.9 - Simplificação do Diagrama de Espaço de Estado da Fig. 3.8.

- b.3) Uma equipe exclusiva para cada subsistema, estratégia FIFO
- Neste caso, cada subsistema possui uma equipe exclusiva de reparo, reduzindo o número de estados no diagrama.

Falha	0	1	2	3
Espera	0	0	0 ou 1	1 ou 2

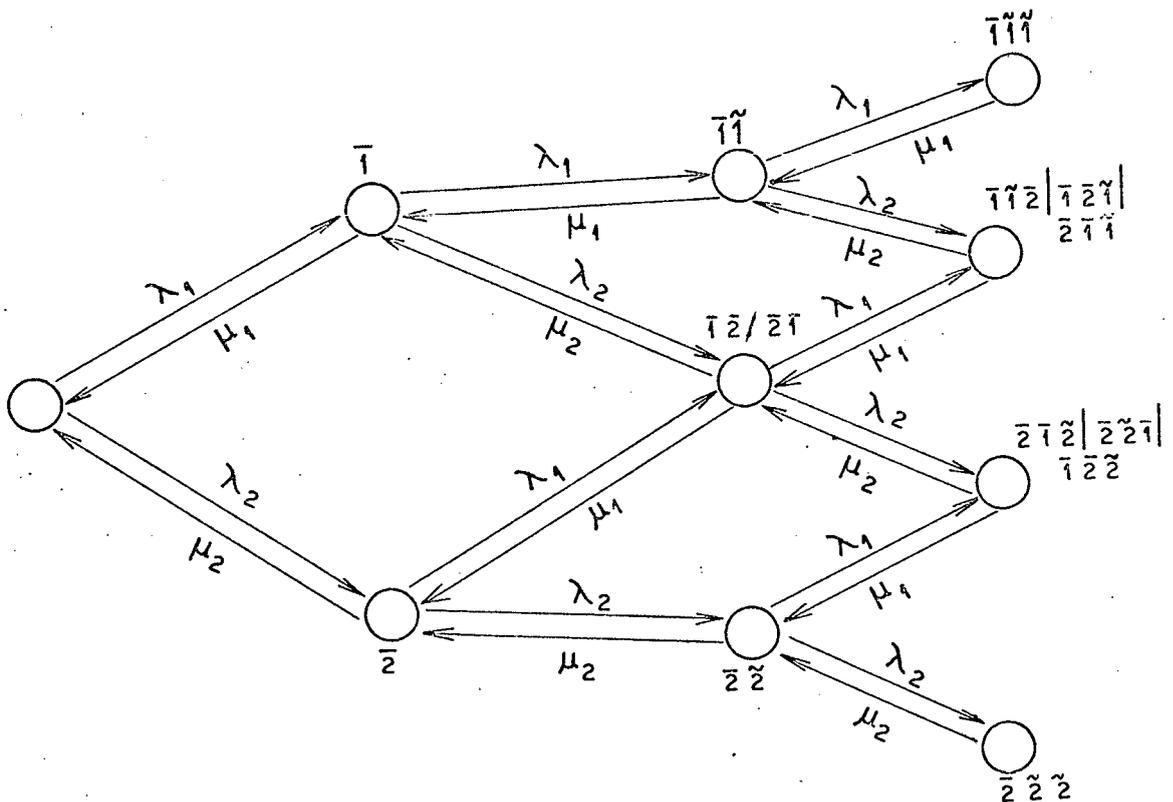


FIGURA 3.10 - Diagrama de Espaço de Estados com uma equipe exclusiva por Subsistema.

Quando as taxas de falha e reparo dos dois subsistemas se aproximam, $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ e $\mu \approx \mu_1 \approx \mu_2$, o modelo simplifica-se como abaixo:

Falha	0	1	2	3
Espera	0	0	0 ou 1	1 ou 2

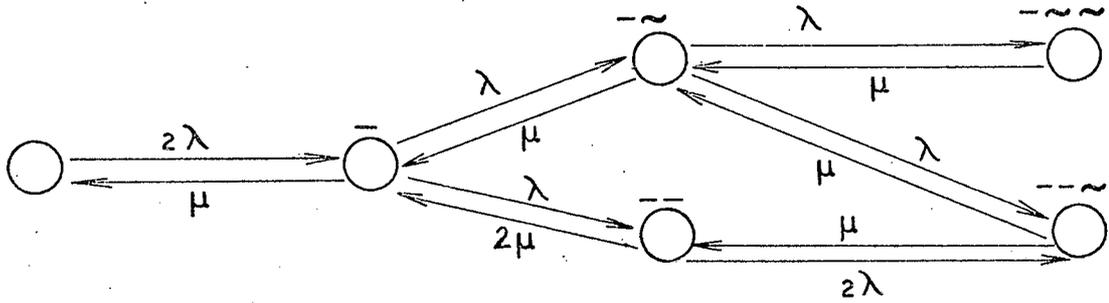


FIGURA 3.11 - Simplificação do Diagrama de Espaço de Estado da Fig. 3.10.

3.5.4 - Frequência de Mudança e Duração Média de Permanência nos Níveis de Falha

O modelo, em estudo, caracteriza-se por um processo de transição do estado i para todos os demais estados do sistema e vice-versa.

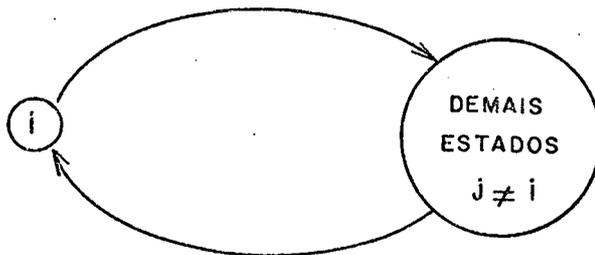


FIGURA 3.12 - Processo de Transição.

Nesta condição, o sistema pode ser representado por um processo a dois estados, conforme diagrama de estado ilustrado na Figura 3.12 [22].

As relações:

$$f_i = p_i \sum_{j \neq i} \lambda_{ij} \quad (3.15)$$

$$T_i = \frac{1}{\sum_{j \neq i} \lambda_{ij}} \quad (3.16)$$

são consideradas generalizações das expressões de frequência de falha e duração média de permanência no nível de falha j .

Os valores λ_{ij} são as taxas de falha e reparo do sistema.

3.6 - Considerações Finais

O Capítulo tratou da análise da confiabilidade de operação de um sistema de distribuição, iniciando pela classificação das interrupções.

Foram definidos os índices operativos comumente usados para avaliar o desempenho de sistemas de distribuição. Apresentaram-se duas metodologias para análise de reparos em sistemas de distribuição, sendo a primeira, uma formulação direta, utilizando o método estatístico da teoria das filas. Geralmente utiliza a priorização e não se preocupa com número de equipes para reparo.

A segunda é uma metodologia nova de atendimento de emergência com limitação do número de equipes para reparos. Utiliza a estratégia FIFO, primeiro a falhar, primeiro a ser atendido. Esta metodologia agrupa os estados operativos dos subsistemas em níveis de falha e aplica o método de Markov.

C A P Í T U L O I V

AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO DESEMPENHO DA
CONFIABILIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO4.1 - Introdução

Para uma melhor avaliação estatística do desempenho do sistema é necessária uma definição da função de distribuição que descreve as ocorrências de falha e reparo e uma estimativa de taxas das ocorrências.

Este Capítulo apresenta algumas aplicações das metodologias propostas, bem como resultados da avaliação do desempenho da confiabilidade do sistema da CEEE, concessionária do estado do Rio Grande do Sul.

A estimação de taxas de falha e reparo é feita através do ajustamento de curvas e também através do Método de Médias móveis, médias acumuladas ou médias sobrepostas. Este método avalia as variações sazonais e a evolução do desempenho do sistema.

O desempenho do sistema é medido a partir de suas falhas, que estão armazenadas no banco de dados da falhas e reparos. O banco de dados é descrito no Apêndice VI.

Os programas desenvolvidos para este Capítulo são apresentados no Apêndice II e V. O Apêndice II descreve o programa de ajustamento de curva, utilizando a função χ^2 para verificar se as ocorrências descrevem a função distribuição indicada. O Apêndice V descreve o programa de cálculo das médias móveis, acumuladas ou sobrepostas.

4.2 - Características Gerais do Sistema Exemplo

O sistema analisado é composto por nove subsistemas, cada qual com uma subestação, alimentadores radiais e seus equipamentos.

As falhas ocorrem ao longo do alimentador, causando interrupção de energia a jusante do ponto de proteção de falha.

O desempenho do sistema é medido de forma global, verificando qual o subsistema que está mais sujeito a falhas, considerando que qualquer ocorrência neste trabalho, possui o mesmo grau de severidade.

A Figura 4.1 apresenta um diagrama unifilar de um dos subsistemas do sistema exemplo deste trabalho.

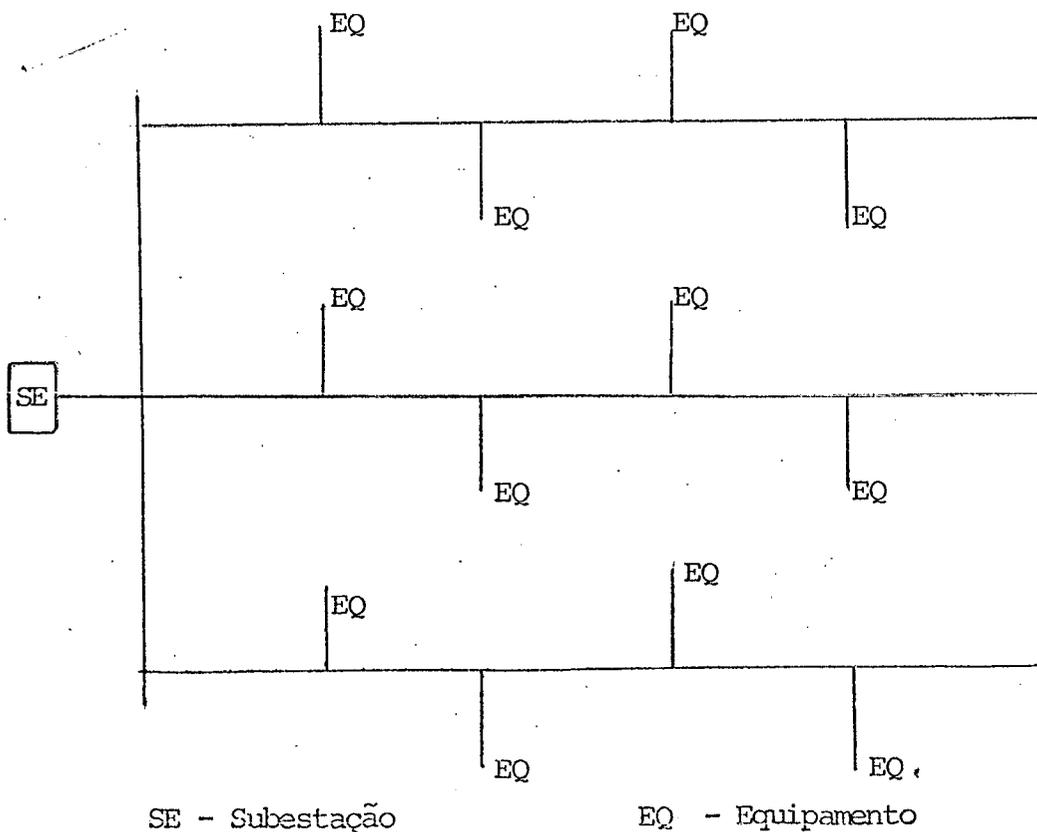


FIGURA 4.1 - Diagrama Unifilar de um Subsistema-Exemplo.

4.3 - Estimativa de Taxas de Ocorrências de Desligamento do Sistema

4.3.1 - Ajustamento de Curvas

Tendo em vista a necessidade de se estimar, por a mostragem, os valores verdadeiros das medidas de confiabilidade, e sendo estas qualificadas de acordo como os dados coletados são tratados, é importante mostrar a diferença do valor observado e do valor estimado de um conjunto de informações. O valor OBSERVADO refere-se ao conjunto de informações obtidas de uma coleção de dados, enquanto que o valor ESTIMADO é resultante do tratamento estatístico dado a esta coleção |13|.

4.3.1.1 - Metodologia Aplicada

O algoritmo desenvolvido, aplicado no sistema-exemplo, utiliza como tipos de função de distribuição: EXPONENCIAL, ERLANG ESPECIAL, NORMAL, WEIBULL e GAMMA e compreende os seguintes passos:

- 1º) Definir o subsistema, tipo de clima, tipo de ocorrência e função desejada.
- 2º) A partir do subsistema e tipo de clima, forma um arquivo auxiliar dos dados desejados.
- 3º) Conforme tipo de ocorrência (falha, reparo ou

aglutinação de falhas) é feito o cálculo de duração, formando um vetor de durações de todas as ocorrências no subsistema em estudo.

4º) Aplicando o Método de Sturges, define-se o número de classes, tamanho da classe e são somadas frequências de ocorrência por classe de duração.

5º) O método de regressão é aplicado e após, com χ^2 , faz-se teste de hipóteses para verificar se a função distribuição descreve as ocorrências.

6º) Se a hipótese não for honesta, há a opção de redefinição de classes, que será feita em função de um limite superior pré-definido do número de observações por classes.

Outra opção disponível é a agregação de classes quando há classes vazias.

Sendo a hipótese honesta, aceita-se a função como descrevendo as ocorrências.

4.3.1.2 - Resultados Obtidos

Para atender a necessidade do ajuste de curvas foi desenvolvido o programa CÁLCULO DE FREQUÊNCIA E DURAÇÃO DE INTERRUPTÕES, descrito no Apêndice II. Este programa adota o critério do qui-quadrado (χ^2) para analisar as curvas representativas das distribuições dos pontos, em um determinado plano e referidos a eixos cartesianos, testando a aderência de um conjunto de curvas.

Estas curvas são descritas e formuladas a seguir:

- Exponencial $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$

- Weibull $f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta}$, $\lambda, \beta, t > 0$

Erlang Especial

$\alpha_i = 1, 2, 3 \dots$

Gamma

$\alpha_i = 1; 1.01; 1.02 \dots 2, 0$

$$f(t) = t^{\alpha-1} \frac{e^{-\frac{t}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

O programa fornece Tabelas contendo faixas de duração, o valor observado de duração de falhas ou reparo contidos nesta faixa e o seu respectivo valor esperado. Após, é efetuado o teste do χ^2 , informando se os dados se ajustam ou não a uma determinada curva escolhida pelo analista.

Nas investigações das curvas, foram selecionadas aquelas que mais aderem aos pontos, traduzindo as taxas médias de desligamento.

Os valores obtidos nesta seção encontram-se em anexo, nas Tabelas 4.1 a 4.8. Junto a cada Tabela, define-se a função de distribuição com seus parâmetros.

Foi aplicada a função Gamma nos vários tipos de ocorrência, mas verificou-se que ela não descreve nenhuma delas. O valor do parâmetro forma é um dado estimado pelo analista, pertencendo à entrada de dados do programa. Se a hipótese de aderência feita pelo χ^2 não é honesta, há uma redefinição de classe e um

novo cálculo é feito no programa.

As falhas e reparos aderem melhor à função Weibull e são apresentadas nas Tabelas 4.1 a 4.6.

No caso de aglutinação de falhas, Tabela 4.7, a função que mais adere é a exponencial. Teoricamente, o método aplicado é Poisson, conforme descrito na seção 2.5. Isto mostra que a função exponencial é um particularidade de Poisson com $K = 0$ ocorrências de falha.

Analisando os resultados, verifica-se que os tempos de reparo não ajustam perfeitamente às curvas.

Na distribuição Gamma, ocorre uma diferença grande no χ^2 calculado e o obtido pelo número de graus de liberdade. O nível de aderência é de 99,5% e o resultado implica em rejeitar a hipótese.

Na distribuição Weibull, foi empregada a técnica de Máxima Verossimilhança. A partir de um valor inicial β pré-determinado, aplica-se o método de Newton e se estima o valor do parâmetro escala α e do parâmetro forma β . Com os valores de α e β , aplica-se a fórmula de ajustamento de curva.

A aderência dos tempos para falha na distribuição Weibull é quase perfeita.

O emprego do método de classes móveis não vazias é apresentado na aglutinação de falhas, Tabela 4.8. Este método é aplicado no exemplo da Tabela 4.7 e apresenta uma diferença razoavelmente menor do χ^2 calculado e crítico.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	6	168	0.3165	0.3165	176.6084
2	12	68	0.4625	0.1460	81.4930
3	18	58	0.5625	0.1000	55.8115
4	24	64	0.6369	0.0743	41.4912
5	30	35	0.6945	0.0576	32.1796
6	36	30	0.7405	0.0459	25.6363
7	42	24	0.7778	0.0372	20.8133
8	48	19	0.8085	0.0307	17.1396
9	54	20	0.8341	0.0255	14.2735
10	60	15	0.8556	0.0214	11.9954
11	66	12	0.8738	0.0182	10.1580
12	72	14	0.8893	0.0155	8.6580
13	78	4	0.9026	0.0132	7.4209
14	84	5	0.9141	0.0114	6.3919
15	90	5	0.9240	0.0099	5.5297
16	96	9	0.9326	0.0086	4.8024
17	102	3	0.9401	0.0075	4.1854
18	108	1	0.9466	0.0065	3.6593
19	114	1	0.9524	0.0057	3.2087
20	120	1	0.9574	0.0050	2.8212
21	126	1	0.9619	0.0044	2.4865
22	132	1	0.9658	0.0039	2.1966

HIPOTESE HONESTA NO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0.995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 35.41508

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 41.40000

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta}$$

$$\lambda = 0.1073 \text{ 1/H}$$

$$\beta = 0.7064$$

TABELA 4.1 - Análise de Frequência e Duração das Ocorrências de Falhas no Subsistema 4, Considerando Clima Bom.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	498	49	0.4208	0.4208	44.6079
2	996	23	0.6096	0.1888	20.0160
3	1494	8	0.7255	0.1159	12.2854
4	1992	5	0.8021	0.0766	8.1213
5	2490	6	0.8549	0.0527	5.5892
6	2988	1	0.8921	0.0372	3.9498
7	3486	4	0.9190	0.0268	2.8455
8	3984	0	0.9386	0.0196	2.0807
9	4482	3	0.9531	0.0145	1.5398
10	4980	1	0.9640	0.0108	1.1508
11	5478	1	0.9722	0.0081	0.8675
12	5976	1	0.9784	0.0062	0.6587
13	6474	0	0.9831	0.0047	0.5033
14	6972	3	0.9868	0.0036	0.3868
15	7470	0	0.9896	0.0028	0.2988
16	7968	0	0.9918	0.0021	0.2319
17	8466	1	0.9935	0.0017	0.1807

HIPÓTESE HONESTA NO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0.995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 32.35319

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 34.30000

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta}$$

$$\lambda = 0.2339 \text{ 1/H}$$

$$\beta = 0.7845$$

TABELA 4.2 - Análise de Frequência e Duração das Ocorrências de Falhas no Subsistema 6, Considerando Clima Bom.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	6	286	0.3823	0.3823	301.3041
2	12	112	0.5453	0.1629	128.4317
3	18	89	0.6504	0.1051	82.8381
4	24	90	0.7245	0.0740	58.3797
5	30	42	0.7792	0.0546	43.0980
6	36	31	0.8208	0.0415	32.7771
7	42	24	0.8531	0.0323	25.4607
8	48	23	0.8786	0.0255	20.0972
9	54	19	0.8990	0.0203	16.0666
10	60	13	0.9155	0.0164	12.9787
11	66	11	0.9289	0.0134	10.5762
12	72	13	0.9399	0.0110	8.6830
13	78	6	0.9490	0.0091	7.1751
14	84	6	0.9566	0.0075	5.9630
15	90	5	0.9629	0.0063	4.9808
16	96	9	0.9682	0.0053	4.1793
17	102	1	0.9727	0.0044	3.5213
18	108	0	0.9765	0.0037	2.9780
19	114	1	0.9797	0.0032	2.5272
20	120	2	0.9824	0.0027	2.1514
21	126	0	0.9847	0.0023	1.8369
22	132	2	0.9867	0.0019	1.5726
23	138	0	0.9884	0.0017	1.3497
24	144	3	0.9899	0.0014	1.1612

HIPÓTESE HONESTA NO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0.995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 41.47530

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 44.20000

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta}$$

$$\lambda = 0.1350 \text{ 1/H}$$

$$\beta = 0.7100$$

TABELA 4.3 - Análise de Freqüência e Duração das Ocorrências de Falhas no Subsistema 4, Desconsiderando Condições Climáticas.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	63	867	0.8039	0.8039	895.5887
2	126	134	0.9108	0.1068	119.0557
3	189	66	0.9523	0.0415	46.2872
4	252	31	0.9722	0.0199	22.1842
5	315	2	0.9829	0.9829	11.8755
6	378	5	0.9890	0.0061	6.8273
7	441	0	0.9927	0.0037	4.1290
8	504	2	0.9951	0.0023	2.5957
9	567	2	0.9966	0.0015	1.6825
10	630	2	0.9976	0.0010	1.1182
11	693	0	0.9982	0.0006	0.7589
12	756	1	0.9987	0.0004	0.5244
13	819	0	0.9990	0.0003	0.3680
14	882	0	0.9993	0.0002	0.2618
15	945	0	0.9995	0.0001	0.1885
16	1008	0	0.9996	0.0001	0.1372
17	1071	0	0.9997	0.0000	0.1008
18	1134	0	0.9997	0.0000	0.0748
19	1197	0	0.9998	0.0000	0.0559
20	1260	0	0.9998	0.0000	0.0421
21	1323	0	0.9999	0.0000	0.0319
22	1386	1	0.9999	0.0000	0.0243
23	1449	0	0.9999	0.0000	0.0187
24	1512	0	0.9999	0.0000	0.0144
25	1575	1	0.9999	0.0000	0.0112

HIPÓTESE REJEITADA DO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0.995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 157.1206

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 45.6000

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^{\beta}}$$

$$\lambda = 0.15467 \quad 1/H$$

$$\beta = 0.5689$$

TABELA 4.4 - Análise de Frequência e Duração das Ocorrências de Reparos no Subsistema 4, Considerando Clima Bom.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	87	346	0.7525	0.7525	362.7395
2	174	64	0.8648	0.1122	54.1080
3	261	34	0.9154	0.0505	24.3765
4	348	13	0.9431	0.0277	13.3787
5	435	6	0.9600	0.0168	8.1297
6	522	7	0.9709	0.0109	5.2690
7	609	5	0.9783	0.0074	3.5732
8	696	1	0.9835	0.0052	2.5069
9	783	1	0.9873	0.0037	1.8064
10	870	1	0.9900	0.0027	1.3301
11	957	0	0.9921	0.0020	0.9971
12	1044	0	0.9937	0.0015	0.7590
13	1131	0	0.9949	0.0012	0.5853
14	1218	0	0.9958	0.0009	0.4566
15	1305	1	0.9966	0.0007	0.3598
16	1392	0	0.9972	0.0005	0.2861
17	1479	1	0.9977	0.0004	0.2293
18	1566	1	0.9980	0.0003	0.1851
19	1653	0	0.9983	0.0003	0.1504
20	1740	0	0.9986	0.0002	0.1230
21	1827	0	0.9988	0.0002	0.1011
22	1914	1	0.9990	0.0001	0.0836

HIPÓTESE HONESTA NO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0.995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 30.24890

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 41.40000

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta}$$

$$\lambda = 0.1376 \quad 1/H$$

$$\beta = 0.5189$$

TABELA 4.5 - Análise de Frequência e Duração das Ocorrências de Reparos no Subsistema 2, Considerando Clima Adverso.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	77	1369	0.8248	0.8248	1393.9612
2	154	175	0.9221	0.0973	164.4835
3	231	78	0.9589	0.0367	62.1697
4	308	30	0.9762	0.0173	29.3111
5	385	15	0.9854	0.0091	15.5235
6	462	5	0.9907	0.0052	8.8591
7	539	6	0.9938	0.0031	5.3318
8	616	2	0.9958	0.0019	3.3408
9	693	3	0.9971	0.0012	2.1611
10	770	1	0.9979	0.0008	1.4348
11	847	0	0.9985	0.0005	0.9736
12	924	0	0.0998	0.0003	0.6730
13	1001	1	0.0992	0.0002	0.4727
14	1078	1	0.9994	0.0001	0.3368
15	1155	0	0.9995	0.0001	0.2429
16	1232	0	0.9996	0.0001	0.1772
17	1309	0	0.9997	0.0000	0.1306
18	1386	1	0.9998	0.0005	0.0971
19	1463	0	0.9998	0.0004	0.0728
20	1540	1	0.9998	0.0003	0.0550
21	1617	0	0.9999	0.0002	0.0418
22	1694	0	0.9999	0.0000	0.0320
23	1771	0	0.9999	0.0000	0.0247
24	1848	0	0.9999	0.0000	0.0191
25	1925	1	0.9999	0.0000	0.0149
26	2006	1	0.9999	0.0000	0.0116

HIPÓTESE REJEITADA NO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0.995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 185.5999

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 46.9000

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta}$$

$$\lambda = 0.1587 \quad 1/H$$

$$\beta = 0.5515$$

TABELA 4.6 - Análise de Frequência e Duração das Ocorrências de Falhas no Subsistema 4, Desconsiderando Condições Climáticas.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	1665	101	0.7656	0.7656	91.1143
2	3330	5	0.9450	0.1794	21.3511
3	4995	4	0.9871	0.0420	5.0032
4	6660	4	0.9969	0.0098	1.1724
5	8325	1	0.9992	0.0023	0.2747
6	9990	2	0.9998	0.0005	0.0643
7	11655	0	0.9999	0.0001	0.0150
8	13320	0	0.9999	0.0000	0.0035
9	14985	0	0.9999	0.0000	0.0008
10	16650	1	0.9999	0.0000	0.0001
11	18315	0	0.9999	0.0000	0.0000
12	19980	0	1.0000	0.0000	0.0000
13	21645	0	1.0000	0.0000	0.0000
14	23310	0	1.0000	0.0000	0.0000
15	24975	0	1.0000	0.0000	0.0000
16	26640	0	1.0000	0.0000	0.0000
17	28305	1	1.0000	0.0000	0.0000

HIPÓTESE REJEITADA NO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0.995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 5229.9180

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 34.3000

$$f(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = 0.05228 \quad 1/H$$

TABELA 4.7 - Análise de Frequência e Duração das Ocorrências de Aglutinação de Falhas nos Subsistemas 5 e 13, desconsiderando Condições Climáticas.

INT. TP	MAX VALOR	FREQ. OBS.	ÁREA 0 - > T	ÁREA DE CLASSE	FREQ. ESP.
1	83	49	0.0697	0.0697	8.3036
2	166	13	0.1345	0.0649	7.7242
3	249	12	0.1950	0.0603	7.1852
4	332	4	0.2512	0.0561	6.6838
5	415	6	0.3034	0.0522	6.2174
6	498	4	0.3520	0.0486	5.7836
7	581	3	0.3972	0.0452	5.3800
8	664	2	0.4393	0.0420	5.0046
9	747	3	0.4784	0.0391	4.6554
10	913	1	0.5487	0.0702	8.3589
11	996	2	0.5802	0.0314	3.7473
12	1494	2	0.7280	0.1478	17.5885
13	3325	5	0.9443	0.2168	25.8038
14	4990	4	0.9870	0.0422	5.0251
15	6655	4	0.9969	0.0098	1.1775
16	8320	5	0.9992	0.0023	0.2759

HIPÓTESE REJEITADA NO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA 0995

QUI-QUADRADO CALCULADO = 337.0954

QUI-QUADRADO CRÍTICO = 32.8000

$$f(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = 0.05228 \text{ 1/H}$$

TABELA 4.8 - Análise de frequência e duração das ocorrências de aputinação de falhas nos Subsistemas 5 e 13 sem classes vazias.

4.3.2 - Modelo das Médias Móveis, Acumuladas e Sobrepostas

4.3.2.1 - Metodologia Aplicada

O algoritmo desenvolvido é aplicado a um conjunto de dados, extraídos do banco de dados do sistema de distribuição de energia elétrica da CEEE e compreende os seguintes passos:

- 1º) Definir o subsistema, tipo de média (móvel, acumulada ou sobreposta), ordem, ou seja, número de meses para inspeção, tipo de clima e se as manobras (interrupção menor ou igual a 3 min.) são contados ou não.
- 2º) Cálculo da duração para falhas e duração de reparos do subsistema i ou para o subsistema todo, na ordem indicada. O cálculo da duração para falhas em tempo qualquer ou bom é diferente do cálculo em tempo adverso.
- 3º) A cada nova ordem, ou seja, número de meses agrupados, são calculadas as durações médias para falha e durações médias de reparo. A partir deste cálculo obtêm-se as taxas de falha e reparo.

No método de médias móveis, neste ponto, os valores de duração para falhas, duração de reparo e frequência de interrupções são inicializados em zero; já no método de médias sobrepostas estes valores são igualados a valores auxiliares (que começam a ser somados a partir do mês indicado para início de sobreposição).

49) A cada cálculo de taxas de falha e reparo são impressos ano, mês, taxas de falha e reparo.

4.3.2.2 - Resultados Obtidos

Os resultados obtidos através da aplicação do método de médias móveis, acumuladas e/ou sobrepostas avaliam a variação sazonal, a evolução do desempenho do sistema e estimam as taxas de falha e reparo do sistema.

As Tabelas 4.9 a 4.13 apresentam as variações das taxas de falha através do modelo de médias, considerando condições climáticas ou não. As médias são tomadas em relação a três meses sendo denominada médias de terceira ordem.

Observando as Tabelas, verifica-se que as taxas de falha em tempo bom são as menores, com pouca diferença das apresentadas em clima qualquer.

As Tabelas de médias móveis em clima qualquer mostram claramente a incidência de períodos de maior ocorrência de falhas (presumidamente devido a períodos de tempo adverso). Observa-se também que nestes períodos as taxas reparo se reduzem, subentendendo-se que nestas situações há um maior esforço para recuperação do sistema.

As taxas de falha e reparo oriundos das médias acumuladas podem ser utilizadas para estudos de desempenho médio do sistema.

ANO	MÊS	TAXAS (1/H)	
		FALHA	REPARO
1	3	0.19887	2.70833
	6	0.17810	0.91875
	9	1.23766	1.30065
	12	0.36332	2.59459
2	3	0.43942	0.55347
	6	0.33169	0.89930
	9	0.34368	1.17831
	12	0.18385	0.66666

TABELA 4.11 - Médias Móveis no Subsistema 4, com Clima Adverso.

ANO	MÊS	TAXAS (1/H)	
		FALHA	REPARO
1	3	0.02237	1.05787
	6	0.02818	1.30630
	9	0.02637	1.41370
	12	0.02963	1.60260
2	3	0.03493	1.28680
	6	0.04010	1.09210
	9	0.03981	1.14050
	12	0.03889	1.12170

TABELA 4.12 - Médias Acumuladas no Subsistema 4 com Clima Qualquer.

ANO	MÊS	TAXAS (l/H)	
		FALHA	REPARO
1	3	0.02237	1.05787
	6	0.03399	1.54468
	9	0.02275	1.77358
	12	0.03885	2.15462
2	3	0.05651	0.90542
	6	0.06554	0.78207
	9	0.38402	1.58900
	12	0.031658	0.96589

TABELA 4.9 - Médias Móveis no Subsistema 4, com Clima Qual quer.

ANO	MES	TAXAS (l/H)	
		FALHA	REPARO
1	3	0.01596	0.87494
	6	0.01730	2.35690
	9	0.01192	1.74496
	12	0.01538	1.36546
2	3	0.03782	1.86761
	6	0.01085	1.30553
	9	0.01708	1.57894
	12	0.01934	1.77514

TABELA 4.10 - Médias Móveis no Subsistema 4, com Clima Bom.

		TAXAS (1/H)	
		FALHA	REPARO
1	4	0.02575	1.48070
	7	0.02606	1.61587
	10	0.02912	2.23760
2	1	0.04410	1.19952
	4	0.05482	0.87086
	7	0.03553	1.22237
	10	0.02686	0.96589

TABELA 4.13 - Médias Sobrepostas no Subsistema 4, com Clima Qualquer.

4.4 - Considerações Finais

Neste Capítulo foi realizada uma avaliação estatística de dados de falha e reparo de um sistema de distribuição, possibilitando medir a sua evolução gradativa, o seu pior período de falhas e a função distribuição que as ocorrências descrevem.

Foram apresentadas duas metodologias. A primeira permite avaliar a função de distribuição que melhor se ajusta às ocorrências e a segunda, além de estimar as taxas de falha e reparo, também avaliam o desempenho dos sistemas.

C A P Í T U L O V

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E DA POLÍTICA
DE REPARO SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO5.1 - Introdução

Observando os desligamentos ocorridos no sistema exemplo, verifica-se que esses ocorrem em uma proporção maior em tempo adverso. Com isso, vê-se a importância de uma análise das influências das condições climáticas sobre o sistema. Este Capítulo descreve um modelo de falha independente para subsistemas, considerando transições climáticas, apresentando o método de Markov, para calcular as probabilidades e durações médias de permanência nos estados e as frequências de mudança dos estados.

São apresentados, também, os resultados da política de reparo sobre o desempenho do sistema exemplo, cujo modelo é descrito no Capítulo III. Este modelo utiliza o Método de Markov para o cálculo das probabilidades de permanência nos estados agrupados em níveis de falha. Esta política de reparo considera os subsistemas com uma a mais falhas operando parcialmente, e os reparos são feitos sem consideração da priorização de falhas. Utiliza a estratégia FIFO, primeiro a falhar, primeiro a ser reparado.

Os programas desenvolvidos para esta parte do trabalho são descritos nos Apêndices III e IV. O Apêndice III descreve o programa de determinação de taxas de transição climática, taxas médias de falha e reparo, em tempo bom e adverso, e o Apêndi

ce IV descreve o programa de cálculo das probabilidades de permanência nos estados, utilizando o método de Markov.

5.2 - Influência das Condições Climáticas

As condições ambientais e as transições climáticas são muito importantes no estudo do desempenho dos Sistemas de Distribuição, pois quase todos componentes do sistema estão expostos à ação atmosférica.

A ocorrência do tempo adverso leva à concentração de incidência de falhas em um curto espaço de tempo. As falhas são múltiplas, independentes e associadas, levando o sistema a níveis de risco muito elevado, em relação ao nível calculado sem a consideração desse fato [21].

A abordagem usual para consideração das transições climáticas sobre a confiabilidade de sistemas expostos ao tempo reduz o universo de condições ambientais a dois estados representativos do clima. A representação mais comum é um modelo ambiental a dois estados, caracterizados como "TEMPO NORMAL" e "TEMPO ADVERSO".

Com base nesta representação, considera-se a taxa de falha total (λ) de um componente ou sistema sendo composta de duas parcelas λ_N e λ_S , onde λ_N é a taxa de falha em condições normais e λ_S é a taxa de falha em condições adversas de tempo [21].

Sendo N e S as durações das condições normal e adversa, respectivamente, tem-se:

$$\lambda = \lambda_N \frac{N}{N + S} + \lambda_S \frac{S}{N + S} \quad (5.1)$$

Esta representação tem como vantagens não necessitar de estatísticas adicionais àquelas disponíveis nas concessionárias, não aumentando a complexidade do espaço de estado. O que deve se ter como importante é que sua aplicação a falhas múltiplas é restrita ao caso de elementos submetidos a condições adversas independentes. Caso esta restrição não seja seguida pode haver erros grosseiros por não reconhecer o efeito de concentração de falhas (FAILURE BUNCHING) em tempo adverso [21].

5.2.1 - Modelo Desenvolvido

As transições de estado do tempo e dos componentes são esquematizadas no diagrama da Figura 5.1 para um componente a dois estados:

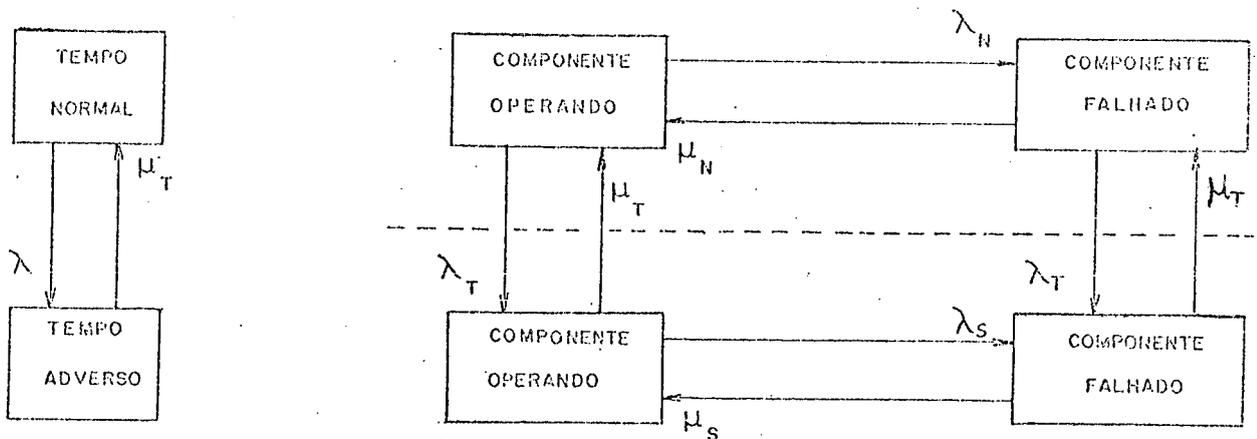


FIGURA 5.1 - Modelo de Falha Independente para Dois Componentes, Considerando Transições Climáticas.

A Figura acima apresenta um modelo de falha independente para dois componentes, sob tempo normal e adverso, com:

λ_T, μ_T - taxas de transição tempo normal - tempo adverso.

$$\lambda_T = \frac{1}{N}, \quad \mu_T = \frac{1}{S}$$

Desenvolvendo o sistema, para dois componentes tem-se:

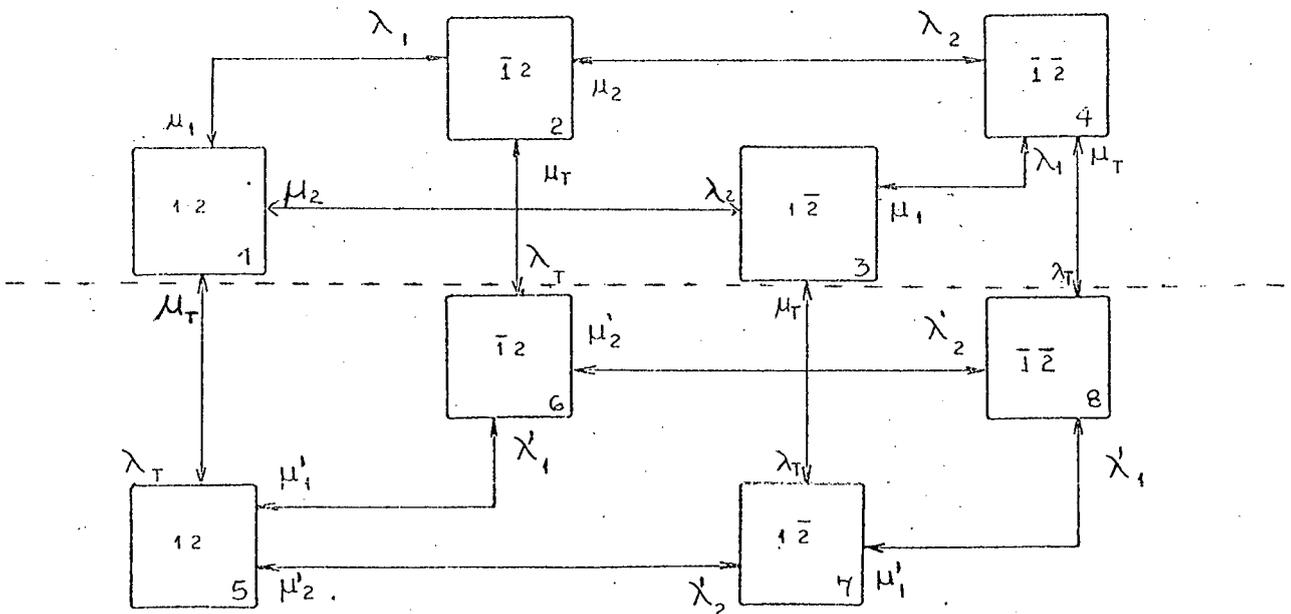


FIGURA 5.2 - Modelo de Falha Múltipla Independente a Dois Subsistemas sob Tempo Normal e Adverso.

Os dados requeridos para aplicação deste modelo são obtidos através do programa descrito no Apêndice III e são:

- λ - taxa de falha em tempo normal.
- λ' - taxa de falha em tempo adverso.
- μ - taxa de reparo em tempo normal.
- μ' - taxa de reparo em tempo adverso.

Este conjunto de dados caracteriza as transições de estado dos componentes. As estatísticas adicionais para o modelo de tempo são:

- λ_s - taxa de falha média em tempo adverso.
- μ_s - taxa de reparo médio em tempo adverso.

As simplificações adotadas ao modelo são feitas em relação à taxa de reparo em tempo adverso. A mais comum é anular esta taxa. Outro tipo de simplificação é considerar a taxa de reparo em tempo adverso igual à taxa de reparo em tempo bom. A primeira simplificação ocorre, porque os reparos são geralmente feitos em tempo bom e a segunda, devido a dificuldade de se obter a taxa de reparo em tempo adverso.

Neste modelo é aplicado o Método de Markov, para calcular as probabilidades, durações médias de permanência nos estados e suas freqüências de mudança de estado.

Os valores obtidos nesta etapa do trabalho encontram-se nas Tabelas de freqüência, duração e taxas de ocorrências de falha e reparo. São apresentadas a seguir (Tabelas 5.1 a 5.10).

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (1/H)	FREQÜÊNCIA
FALHA	NORMAL	16.99480	0.058840	923
	ADVERSO	4.33038	0.230920	429
	QUALQUER	12.97633	0.077060	1352
REPARO	NORMAL	1.05592	0.947030	923
	ADVERSO	1.80132	0.555140	429
	QUALQUER	1.29240	0.773720	1352
TRANSIÇÃO CLIMÁTICA	NORMAL	172.37650	0.005801	91
	ADVERSO	20.41460	0.048984	

TABELA 5.1 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 1.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (1/H)	FREQÜÊNCIAS
FALHA	NORMAL	13.71511	0.072912	1148
	ADVERSO	3.73247	0.267919	482
	DESCONSIDERANDO	10.76319	0.092909	1630
REPARO	NORMAL	0.87593	1.141640	1148
	ADVERSO	1.47815	0.676522	482
	DESCONSIDERANDO	1.05401	0.948750	1630
TRANSIÇÃO CLIMÁTICA	NORMAL	148.53720	0.006732	106
	ADVERSO	16.97217	0.058919	

TABELA 5.2 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 2.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (1/H)	FREQÜÊNCIA
FALHA	NORMAL	11.29256	0.088550	1392
	ADVERSO	2.54498	0.392930	717
	QUALQUER	8.31832	0.120212	2109
REPARO	NORMAL	1.09732	0.911312	1392
	ADVERSO	1.84823	0.541057	717
	QUALQUER	1.35261	0.739312	2109
TRANSIÇÃO CLIMÁTICA	NORMAL	117.30783	0.008524	134
	ADVERSO	13.61755	0.073434	

TABELA 5.3 - Duração Média, Taxas e Freqüências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 3.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (H)	FREQÜÊNCIA
FALHA	NORMAL	14.23333	0.0702500	1115
	ADVERSO	2.90092	0.3447170	577
	QUALQUER	10.36879	0.0964430	1692
REPARO	NORMAL	0.76474	1.3076300	1115
	ADVERSO	1.05621	0.9467800	577
	QUALQUER	0.86414	1.1572260	1692
TRANSIÇÃO CLIMÁTICA	NORMAL	161.94048	0.0061751	98
	ADVERSO	17.07994	0.0585480	

TABELA 5.4 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 4.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (1/H)	FREQÜÊNCIA
FALHA	NORMAL	17.72076	0.056430	886
	ADVERSO	4.17059	0.239770	442
	QUALQUER	13.21084	0.075690	1328
REPARO	NORMAL	1.01200	0.988140	886
	ADVERSO	1.89615	0.527383	442
	QUALQUER	1.30627	0.765535	1328
TRANSIÇÃO CLIMÁTICA	NORMAL	180.46660	0.005541	87
	ADVERSO	21.18849	0.047195	

TABELA 5.5 - Duração Média, Taxas e Freqüências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 5.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (L/H)	FREQUÊNCIA
FALHA	NORMAL	6.97260	0.14341	2171
	ADVERSO	2.40403	0.41596	1001
	QUALQUER	5.53090	0.18080	3172
REPARO	NORMAL	1.41799	0.70522	2171
	ADVERSO	2.23786	0.44685	1001
	QUALQUER	1.67670	0.59640	3172
TRANSIÇÃO	NORMAL	89.57140	0.01116	169
CLIMÁTICA	ADVERSO	14.23920	0.07022	

TABELA 5.6 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 6.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (1/H)	FREQUÊNCIA
FALHA	NORMAL	6.44468	0.155166	2384
	ADVERSO	1.89226	0.528468	1152
	QUALQUER	4.96154	0.201550	3536
REPARO	NORMAL	1.42416	0.702167	2384
	ADVERSO	2.13222	0.468775	1152
	QUALQUER	1.65517	0.604169	3536
TRANSIÇÃO	NORMAL	86.80292	0.011520	177
CLIMÁTICA	ADVERSO	12.31572	0.081197	

TABELA 5.7 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 8.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (L/H)	FREQUÊNCIA
FALHA	NORMAL	18.76216	0.05329800	861
	ADVERSO	4.16098	0.24032800	334
	QUALQUER	14.68117	0.06811400	1195
REPARO	NORMAL	0.98320	1.01708000	861
	ADVERSO	1.55569	0.64321400	334
	QUALQUER	1.14293	0.87494500	1195
TRANSIÇÃO	NORMAL	197.00282	0.00507600	82
CLIMÁTICA	ADVERSO	16.94826	0.05900311	

TABELA 5.8 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema 9.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXA (1/H)	FREQUÊNCIA
FALHA	NORMAL	5.16467	0.193620	2958
	ADVERSO	1.57206	0.636106	1442
	QUALQUER	3.98727	0.250797	4400
REPARO	NORMAL	1.64910	0.606380	2958
	ADVERSO	2.44511	0.408979	1442
	QUALQUER	1.90998	0.523566	4400
TRANSIÇÃO	NORMAL	69.44128	0.014400	220
CLIMÁTICA	ADVERSO	10.30417	0.097048	

TABELA 5.9 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas no Subsistema I3.

OCORRÊNCIA	TIPO DE CLIMA	DURAÇÃO MÉDIA (H)	TAXAS (L/H)	FREQUÊNCIA
FALHA	NORMAL	0.41775	2.393750	13839
	ADVERSO	1.06927	0.935210	6574
	QUALQUER	0.85945	1.163530	20413
REPARO	NORMAL	1.26135	0.792790	13839
	ADVERSO	1.97749	0.505691	6574
	QUALQUER	1.49199	0.670240	20413
TRANSIÇÃO	NORMAL	22.42073	0.044601	660
CLIMÁTICA	ADVERSO	4.16108	0.240320	

TABELA 5.10 - Duração Média, Taxas e Frequências das Ocorrências de Falha, Reparo e Transições Climáticas em todo Sistema.

Analisando os resultados verificou-se que a duração média das interrupções oscilou entre 0.87 H a 1.94 H. Isto mostra que a duração média de desligamento não supera a 2HS.

As taxas de reparo referentes a falhas em tempo bom são sempre maiores que as referentes a falhas ocorridas em tempo adverso, quase na razão 2:1.

As taxas de falha em tempo adverso são sempre maiores que as em tempo bom, numa razão de 4:1.

O número de transições climáticas oscila bastante para cada subsistema, pois cada subsistema tem diferente número de ocorrências de falhas em diferentes instantes. Mas verificou-se que as durações das condições normal e adversa nos subsistemas estão em torno de uma faixa de valores, sendo a duração média em tempo adverso entre 12 e 17 HS e a duração média em tempo bom entre 70 e 160 HS. Deve-se salientar que o período de estudo de análise dos dados é dois anos, em torno de 17544 HS.

Para uma estimativa mais confiável nas taxas de transições climáticas, foi feita a reunião de todos os subsistemas em um sistema só. Porém, no exemplo aplicado, há muitas transições em pequena fração de tempo devido a possíveis erros de codificação e dos operadores. Por este motivo utiliza-se para aplicar o Método de Markov, os valores das taxas de transição dos subsistemas individuais, que apresentam entre si alguma consistência.

Teoricamente, a reunião de todos os dados deveria dar um resultado mais confiável, porém a prática mostra os resultados bastantes irreais devido aos erros acima mencionados.

Como há muitas transições, considerando o sistema todo, em torno de 660, o valor de duração média em tempo bom é muito baixo, cerca de três vezes menor que as durações médias em tempo bom dos subsistemas indivi

duais, cujo valor corresponde mais à realidade climática do local.

5.3 - Aplicação ao Método de Markov

5.3.1 - Considerando as Transições Climáticas

A aplicação do método segue as diretrizes descritas na seção 2.4, onde há a formulação do modelo.

O método fornece a probabilidade e duração média do sistema permanecer nos estados de operação e/ou falha e as frequências de mudança dos estados.

O programa desenvolvido para aplicação deste método é descrito no Apêndice IV e o modelo é apresentado no Figura - 5.2.

Considerou-se como subsistema 1, a subestação 4 e como subsistema 2, a subestação 9 da CEEE. As taxas de falha, reparo e transições climáticas foram calculadas de acordo com o item 5.2, deste Capítulo.

O exemplo desenhado no diagrama de estado da Figura 5.2 é definido em 8 estados, divididos em tempo bom e adverso.

Analisando os resultados, verifica-se que probabilidade do sistema permanecer no estado 1 (sistema operando em tempo bom) é alta, o que é meta para qualquer concessionária tomar o valor o mais alto possível. As baixas probabilidades dos demais estados indicam baixa incidência de falha e/ou rapidez de reparo. Considera-se a taxa de reparo nula em clima adverso, pois a probabilidade de recuperação de um sistema ou equipamento é muito difícil em tempo adverso.

O regime transitório plota as curvas de probabi

lidades de permanência nos estados e é apresentado no Gráfico 5.1.

A Tabela 5.13 apresenta as probabilidades de permanência nos estados do modelo do sistema composto pela SUBESTAÇÃO 9 e SUBESTAÇÃO 4.

5.3.2 - Aplicação de Markov a Reparos Limitados

Considerando a hipótese de que a concessionária possui falta de recursos humanos para atender a demanda de serviço, foi desenvolvido uma metodologia para o cálculo das probabilidades de residência nos estados e níveis de falha através do processo de Markov. Devido à incidência de mais de três falhas concomitantes ser pequena, a aplicação do método toma como exemplo, o nível de falha não ser superior a três e o máximo de e quipes ser duas.

O algoritmo desenvolvido segue as diretrizes propostas no Capítulo II, seção 5, adaptados à realidade da CEEE. Os procedimentos para o cálculo das probabilidades em sistemas com reparos compreendem os seguintes passos:

- 1º) Definir os subsistemas com suas taxas falha e reparo.
- 2º) Definir o tipo de reparo a ser empregado e definir os estados dos subsistemas em relação a falhas, sendo recuperado ou esperando por uma recuperação.

3º) Definir os caminhos entre os estados.

4º) Adaptar os dados no programa descrito e exemplificado no Apêndice V.

5.3.3 - Exemplos de Aplicação de Markov

A seguir são apresentados cinco exemplos para os tipos de reparo:

1 - Reparo Irrestrito

a) Considerando Transições Climáticas

PROBABILIDADE DE	CLIMA	ESTADOS	PROBABILIDADE
Operar	NORMAL	1	0.81688006
2 Reparar	NORMAL	2	0.04096173
1 Reparar	NORMAL	3	0.06201797
1 e 2 Reparar	NORMAL	4	0.01400659
Operar	ADVERSO	5	0.04445648
2 Reparar	ADVERSO	6	0.00228265
1 Reparar	ADVERSO	7	0.01577214
1 e 2 Reparar	ADVERSO	8	0.00362237

TABELA 5.11 - Probabilidade de Permanência em Estados Independentes na Aplicação de Markov, com Influência das Transições Climáticas (Fig.5.2)/ (Gráfico 5.1).

b) Considerando Reparos por Equipes

NÍVEIS DE FALHA	ESTADOS	PROBABILIDADES
0	1	0.85096610
1	2	0.07093408
1	3	0.06622778
2	4	0.00300269
2	5	0.00541766
2	6	0.00263546
3	7	0.00008341
3	8	0.00035776
3	9	0.00030666
3	10	0.00006839

TABELA 5.12 - Probabilidade de Permanência nos Estados, na Aplicação de Markov com Estados Agregados em Níveis de Falha, para Reparo Irrestrito (Figura 3.4)/ (Gráfico 5.2).

2 - Reparo Restrito

a) Uma só equipe, estratégia FIFO

NÍVEIS DE FALHA	ESTADOS	PROBABILIDADE
0	1	0.83980199
1	2	0.07128205
1	3	0.0636678
2	4	0.0060349
2	5	0.00541972
2	6	0.0053944
2	7	0.0048444
3	8	0.0005029
3	9	0.0003552
3	10	0.00045168
3	11	0.000319
3	12	0.0005961
3	13	0.00041995
3	14	0.0005339
3	15	0.00037716

TABELA 5.13 - Probabilidades de Permanência nos Estados na Aplicação de Markov com Estados Agregados a Níveis de Falha, para Reparos Limitados a 1 Equipe (Figura 3.6)/(Gráfico 5.3).

b) Duas Equipes, Estratégia FIFO

NÍVEIS DE FALHA	ESTADOS	PROBABILIDADES
0	1	0.8506994
1	2	0.0707117
1	3	0.0664716
2	4	0.00295365
2	5	0.00520494
2	6	0.00290757
3	7	0.00012308
3	8	0.00008693
3	9	0.00024873
3	10	0.00017566
3	11	0.00015424
3	12	0.00022638

TABELA 5.14 - Probabilidade de Permanência nos Estados, na Aplicação de Markov com Estados Agregados em Níveis de Falha, para Reparo Restrito a Duas Equipes. (Figura 3.8)/(Gráfico 5.4).

- c) Uma Equipe Exclusiva para cada Subsistema, Estratégia
FIFO

NÍVEIS DE FALHA	ESTADOS	PROBABILIDADES
0	1	0.845465
1	2	0.07046097
1	3	0.06581907
2	4	0.0058722
2	5	0.00548535
2	6	0.00512400
3	7	0.00048939
3	8	0.00045715
3	9	0.00042703
3	10	0.00039892

TABELA 5.15 - Probabilidades de Permanência nos Estados, na Aplicação de Markov com Estados Agregados em Níveis de Falha para Reparos Restritos a Equipes Exclusivas a Subsistemas (Fig.3.10)/(Gráf.5.5).

Os gráficos a seguir correspondem ao regime transitório dos modelos de Markov apresentados no exemplo.

O Gráfico 5.1 representa as probabilidades em vários instantes, dos estados do sistema na aplicação de Markov, considerando transições climáticas. Cada letra corresponde um estado.

Os Gráficos 5.2 a 5.5 representam as probabilidades em vários instantes, dos estados do sistema na aplicação de Markov, considerando níveis de falha. Cada letra corresponde um nível de falha.

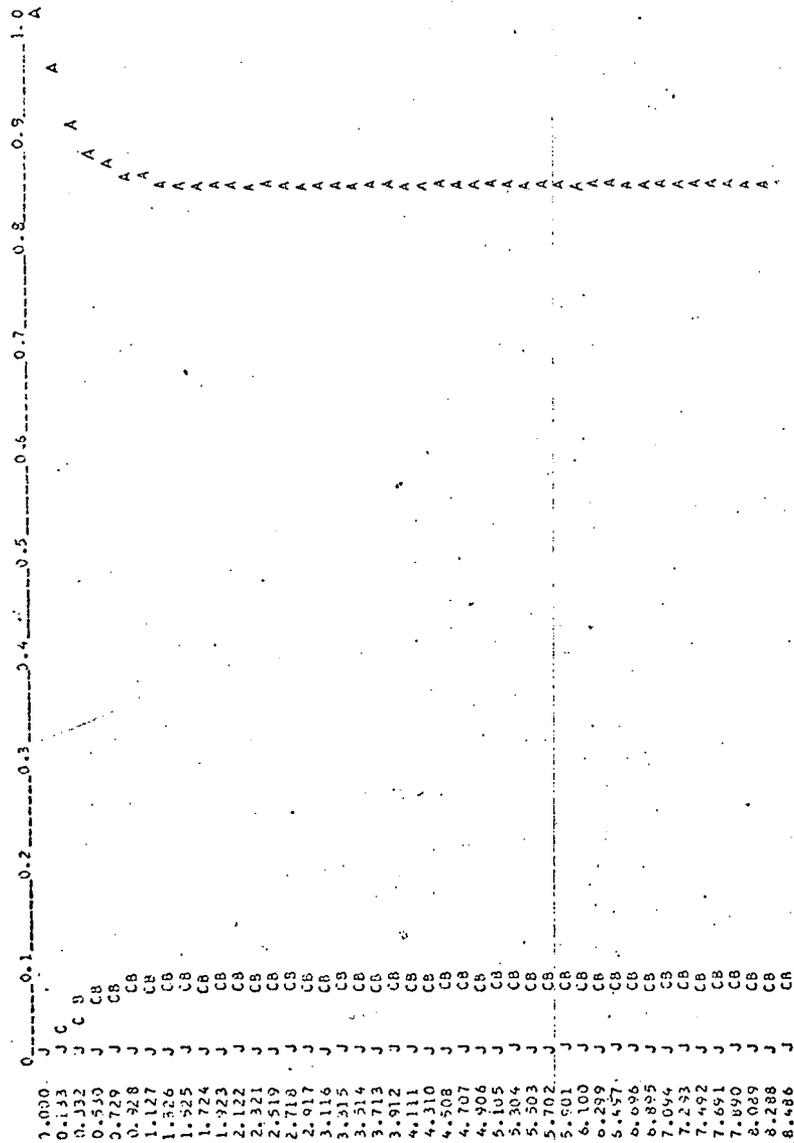


GRÁFICO 5.2 - Regime Transitório do Sistema Exemplo na Aplicação do Método de Markov, considerando Níveis de Falha, para Reparo Irrestrito.

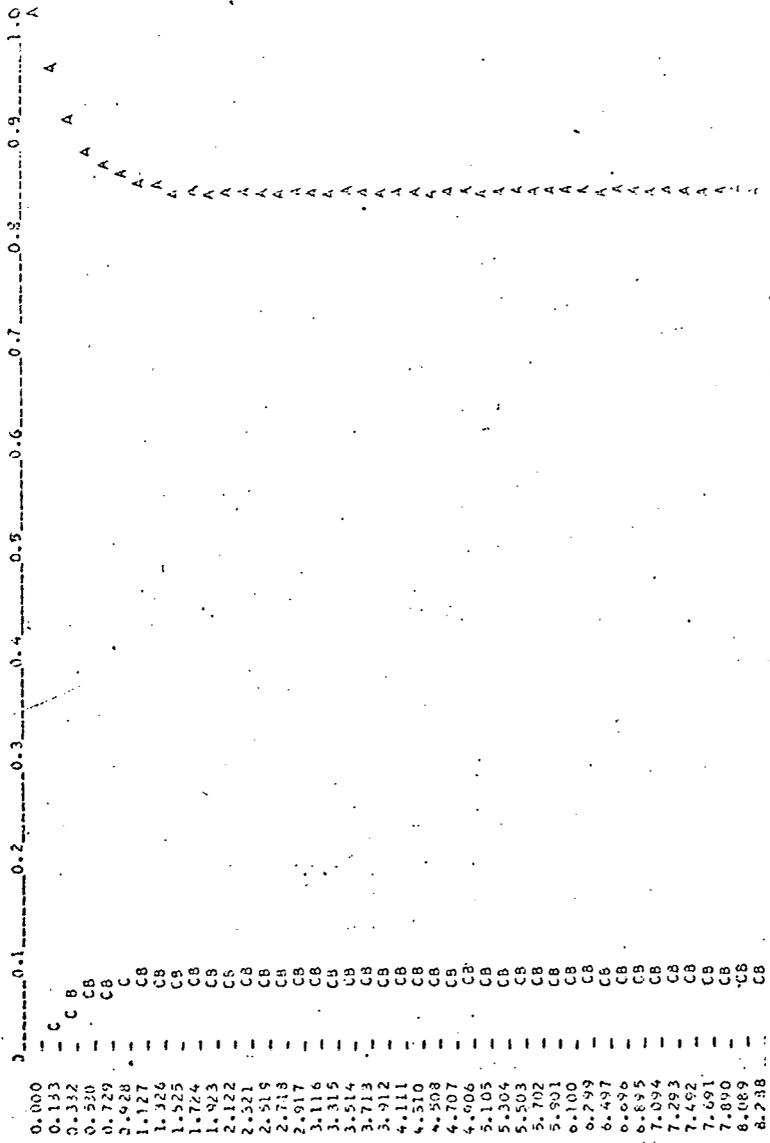


GRÁFICO 5.3 - Regime Transitório do Sistema Exemplo na Aplicação do Método de Markov, considerando Níveis de Falha, para Reparos Restritos a Uma Equipe.

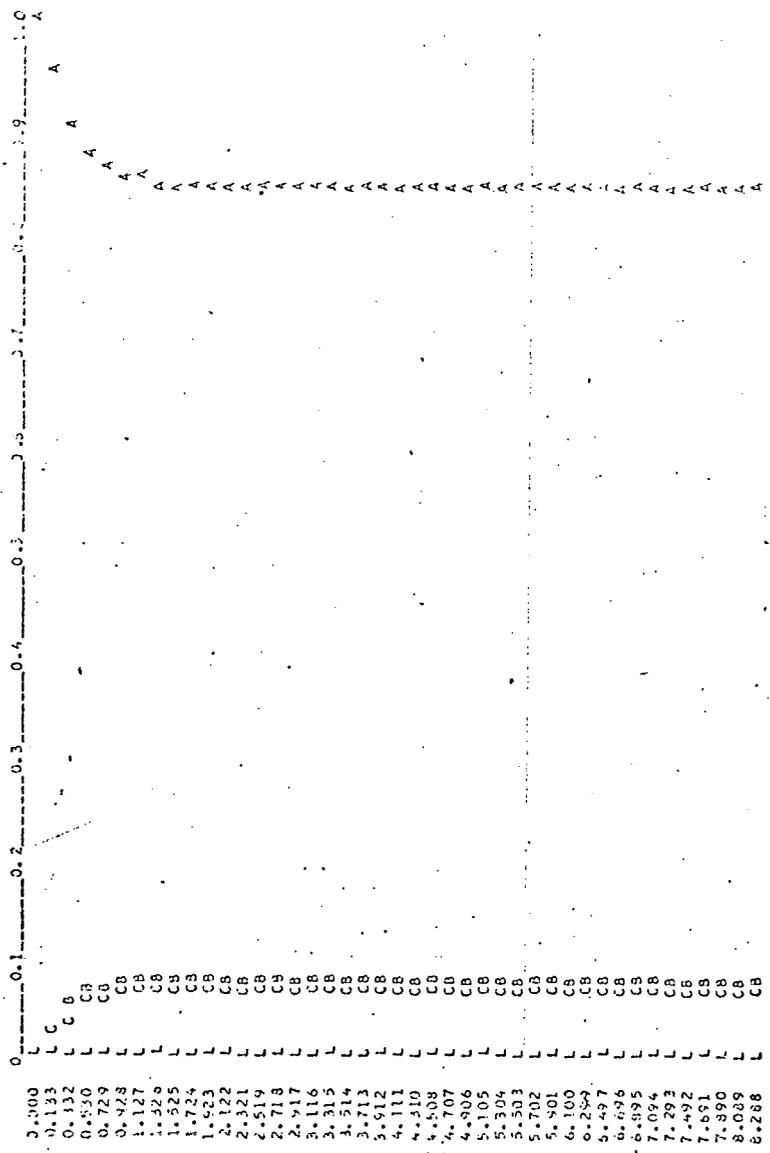


GRÁFICO 5.4 - Regime Transitório do Sistema Exemplo na Aplicação do Método de

Markov, considerando Níveis de Falha, para Reparo Restrito a

Duas Equipes.

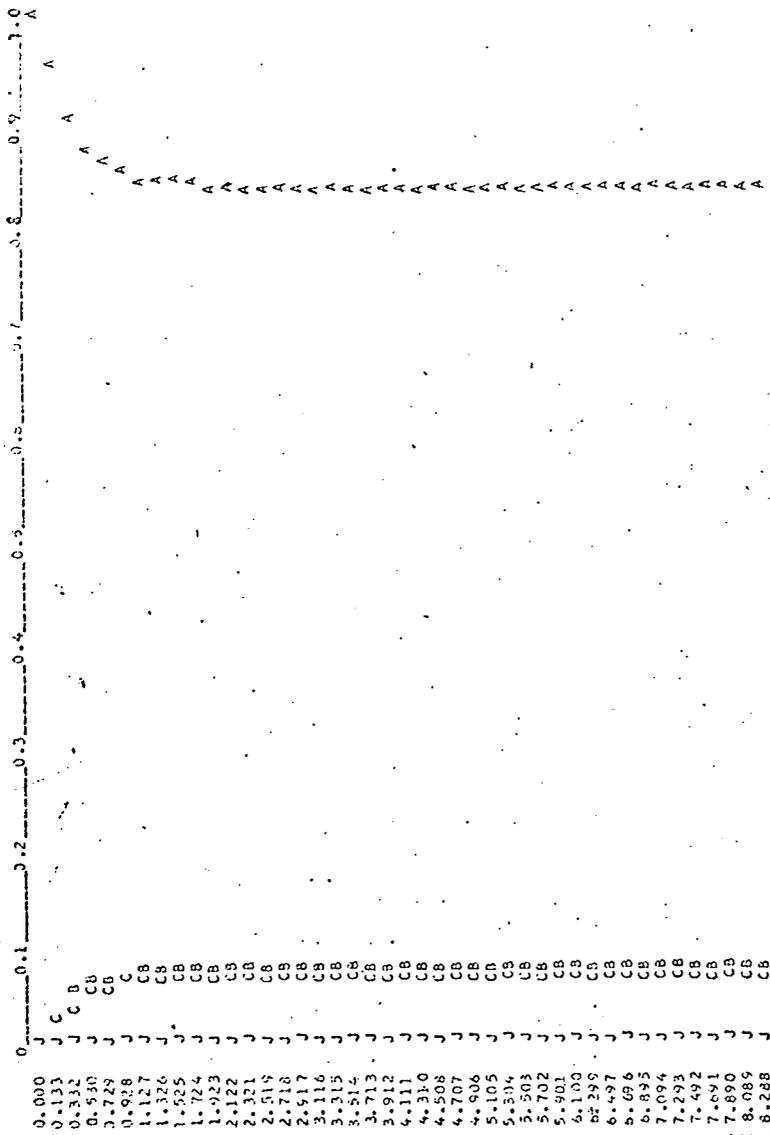


GRÁFICO 5.5 - Regime Transitório do Sistema Exemplo na Aplicação do Método de Markov, considerando Níveis de Falha, para Reparo Restrito a e quipes Exclusivas a cada Subistema.

5.3.4 - Cálculo da Frequência de Mudança de Estado e Duração Média da Permanência nos Estados

No cálculo das probabilidades de permanência nos estados por Markov, considerando os estados totalmente independentes, cada estado possuirá uma frequência de mudança de estado e uma duração média de permanência. Este exemplo é aplicado no sistema em estudo, considerando as transições climáticas. O modelo da Figura 5.2 com 8 estados, apresenta as seguintes frequências de estado e duração média de permanência no estado.

PROBABILIDADE DE	CLIMA	ESTADO	FREQUÊNCIA	D.MÉDIA (H)
Operar	NORMAL	1	0.1034235	7.89839
2 Reparar	NORMAL	2	0.04479251	0.9144772
1 Reparar	NORMAL	3	0.3991138	1.5537965
1 e 2 Reparar	NORMAL	4	0.01989421	0.704053
Operar	ADVERSO	5	0.06063646	0.73316417
2 Reparar	ADVERSO	6	0.00532055	0.429025
1 Reparar	ADVERSO	7	0.0253374	0.622483
1 e 2 Reparar	ADVERSO	8	0.0086329	0.41195987

TABELA 5.16 - Frequência de Mudança de estado e Duração Média de Permanência nos Estados.

Analisando os resultados verifica-se que a maior frequência de mudança de estado é a do estado 1, com a maior duração média de permanência no estado. Isto mostra que o sistema

opera relativamente bem em tempo bom. A frequência de mudança de estado vai diminuindo relativamente até o estado 5, quando seu valor sobe. O estado 5 indica o sistema operando em tempo adverso. O estado 8, que representa os dois sistemas com ocorrências de falha em tempo adverso apresenta menor frequência de mudança de estado e menor duração média de permanência no estado.

Considerando os reparos, os estados de mesmo nível de falha são agregados. Nos quatro modelos, descritos no trabalho, as frequências de mudança dos estados e duração média de permanência nos estados são apresentados a seguir:

a) Reparo Irrestrito com Equipes e até 3 Falhas.

PROBABILIDADE DE OPERAR	NÍVEIS DE FALHA	FREQUÊNCIA	D. MÉDIA (H)
SEM FALHAS	0	1.26029	6.0769224
COM 1 FALHA	1	2.91489	0.423498
COM 2 FALHAS	2	0.65573	0.201740
COM 3 FALHAS	3	0.07464	0.098416

TABELA 5.17 - Frequência de Mudança de Nível de Falha e Duração Média de Permanência nos Níveis de Falha para Reparo Irrestrito.

b) Reparo Restrito com Uma Equipe

PROBABILIDADE DE OPERAR	NÍVEL DE FALHA	FREQUÊNCIA	D. MÉDIA (H)
SEM FALHA	0	2.0294	6.07692
COM 1 FALHA	1	4.7278	0.4234
COM 2 FALHAS	2	1.6439	0.15174
COM 3 FALHAS	3	0.4976	0.09841

TABELA 5.18 - Frequência de Mudança de Nível de Falha e Duração Média de Permanência nos Níveis de Falha para Reparo Restrito a Uma Equipe.

c) Reparo Restrito com Duas Equipes

PROBABILIDADE DE OPERAR	NÍVEL DE FALHA	FREQUÊNCIA	D. MÉDIA (H)
SEM FALHA	0	1.5398	6.07692
COM 1 FALHA	1	3.56321	0.4234
COM 2 FALHAS	2	0.80135	0.15239
COM 3 FALHAS	3	0.13267	0.08415

TABELA 5.19 - Frequência de Mudança de Nível de Falha e Duração Média de Permanência nos Níveis de Falha para Reparo Restrito a Duas Equipes.

d) Reparo Restrito com Uma Equipe Exclusiva para cada Subsistema.

PROBABILIDADE DE OPERAR	NÍVEL DE FALHA	FREQUÊNCIA	D. MÉDIA (H)
SEM FALHA	0	1.2521	6.07692241
COM 1 FALHA	1	2.8961	0.4234982
COM 2 FALHAS	2	0.6761	0.2193938
COM 3 FALHAS	3	0.09725	0.16402819

TABELA 5.20 - Freqüência de Mudança de Nível da Falha e Duração Média de Permanência nos Níveis de Falha, para Reparo Restrito a Equipes Exclusivas a cada Subsistema.

Analisando estes resultados, verifica-se que a freqüência de mudança de do nível 1 no caso de reparo restrito a 2 equipes é a maior pois as duas equipes podem atender a qualquer componente falho aos 2 subsistemas, já a duração média de permanência no nível 3 é menor, pois os componentes são mais rapidamente reparáveis.

5.4 - Considerações Finais

Este Capítulo apresentou uma análise das influências das condições climáticas sobre o desempenho de confiabilidade de um sistema de distribuição constatando maior incidência de falhas em tempo adverso. Esta análise também contribuiu com a estimativa dos parâmetros em tempo bom e adverso. Também foi

constatado que as concessionárias possuem dificuldades de fazerem uma análise estatística mais minuciosa devido a erros humanos quanto à observação da ocorrência e a entrega deste dado ao computador.

Foi aplicada ao sistema exemplo uma metodologia nova de atendimento de emergência para manutenção com número limitado de equipes de reparo. Esta metodologia é descrita no Capítulo III. Utiliza o Método de Markov para avaliar as probabilidades de ocorrência dos estados agregados em níveis de falha.

C A P Í T U L O VI

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS6.1 - Síntese do Trabalho

No Capítulo primeiro, foi apresentada a necessidade do estudo de confiabilidade em sistemas Elétricos, como forma de monitorização da qualidade destes sistemas em termos de continuidade de serviço. Estes estudos tiveram grande desenvolvimento já há algum tempo em sistemas de geração e transmissão de energia, sendo o estudo em sistemas de distribuição mais recente.

Foram apresentadas, no Capítulo 2, as metodologias utilizadas em confiabilidade, dentre as quais destacou-se o Processo de Markov, que é um processo estocástico, como forma mais adequada de obtenção dos cálculos de probabilidade de permanência nos estados durante regimes transitórios de mudança de estados. Foram descritas formas utilizadas para obtenção dos valores instantâneos das probabilidades e de seus valores em regime permanente. Foi descrito também o Processo de Poisson, sendo aplicado em caso de aglutinação de falhas.

Os métodos de cálculo das probabilidades, frequência e duração de permanência nos estados foram assunto do Capítulo 3, no qual foram também desenvolvidas duas diferentes metodologias para reparos no sistema em relação a equipes de manutenção.

A primeira metodologia sugerida aplica a teoria das filas e não se refere a reparos restritos. Esta metodologia não foi aplicada neste trabalho por falta de dados no atual Ban

co de Dados adotado. A segunda metodologia é aplicada a reparos restritos e congrega os estados de mesmo número de falhas em níveis de falha. Como os subsistemas analisados têm em média até três falhas superpostas ocorrendo em componentes, no exemplo, o maior nível de falha dos subsistemas é três. A estratégia utilizada é a FIFO. ou seja, o primeiro a falhar é o primeiro a ser reparado.

Esta metodologia foi aplicada, fazendo vários testes com valores de taxa de falha e reparo dos subsistemas e ficou constatado que a probabilidade de permanência no estado ZERO é a maior. Quanto o nível de falha, menor se torna a probabilidade de ocorrência.

Com o agrupamento de diversos estados em um mesmo nível de falha se obtém considerável economia de tempo e memória computacional em comparação com o método de Markov que individualiza todos os estados.

Os exemplos da metodologia aplicada foram apresentados no Capítulo 5, fazendo uma análise em cada etapa do método.

Este método, através dos índices adicionais obtidos, monitora o desempenho do sistema de forma global, em termos de técnica de despacho, utilizando taxas médias das ocorrências. Mesmo que a análise estatística tenha demonstrado que as ocorrências de falha e reparo não seguem exatamente uma função exponencial, verificou-se que as funções que as descrevem (Weibull) se aproximam da exponencial.

No Capítulo 4, foram feitas avaliações das distribuições das durações das ocorrências de desligamento do sistema. No ajustamento das curvas de durações de ocorrência versus ocorrência, foram testadas com o emprego de aderência do χ^2 , qual a

melhor função distribuição, que cada tipo de ocorrência descreve. Para estes testes serem feitos, foi necessário estabelecer parâmetros para aplicabilidade das funções Weibull e Gamma.

O método das médias móveis, acumuladas e sobrepostas foi feito para estimar as taxas de falha, verificando uma alta taxa de falha em tempo adverso. Este método também avaliou a evolução de desempenho do sistema e a variação sazonal.

O Capítulo 5 apresentou uma análise das influências das condições climáticas e da política de reparo sobre o desempenho do sistema. Neste Capítulo foram apresentados e analisados os exemplos dos Modelos de Markov para reparos restritos. Para aplicá-los surgiram dificuldades de unir a teoria à prática verificada com a utilização do Banco de Dados.

O tratamento estatístico de dados, oriundos do Banco de Dados é um ferramental que possa avaliar o desempenho de confiabilidade a nível de subsistema e futuramente a nível de seus componentes. O Banco de Dados utilizado neste trabalho, além da duração de interrupção e condições climáticas, dados necessários para serem aplicados no modelo, apresenta outros dados que poderão ser utilizados em futuros trabalhos. Ficou constatado que houve falta de dados para estimação de taxas de ocorrências de desligamento em função do clima, pois a busca de transições climáticas é feita indiretamente através das ocorrências de interrupções.

6.2 - Conclusão do Trabalho

O objetivo deste trabalho foi analisar estatisticamente as ocorrências de falha de um sistema de distribuição e apresentar uma metodologia nova de atendimento de emergência com

limitação do número de equipes.

Quanto à análise estatística das ocorrências de falha, o trabalho chega às seguintes conclusões:

A função que melhor descreve tanto as falhas como os reparos é a função Weibull, por ser uma função mais ampla e descreve qualquer ocorrência. A função Weibull descreve melhor as falhas que os reparos.

Não houve sucesso no ajuste das funções Erlang Especial e Gamma a qualquer tipo de ocorrências analisadas.

A aglutinação de falhas é melhor descrita pela função exponencial, porém não é perfeitamente adequada. Das várias funções testadas, esta foi a melhor função em aglutinação de falhas que se adequou, sendo a hipótese rejeitada, com o χ^2 calculado em torno de dez vezes o do χ^2 crítico.

Na estimação das taxas de falha pelo método das médias móveis, verificou-se uma alta taxa de falha em tempo adverso, do que se conclui que as falhas são em grande número neste tipo de condição climática. A evolução gradativa do desempenho do sistema permanece constante e a variação sazonal é verificada a partir da variação das taxas de falha do sistema.

Quanto à análise da influência das condições climáticas verificaram-se muitos erros na observação do sistema e/ou na codificação dos dados, pois o número de transições climáticas quando se analisa o sistema todo é muito grande. No caso, haveria uma transição climática por dia o que não é possível na região onde o exemplo foi aplicado.

A contribuição principal deste trabalho foi o estabelecimento de uma nova metodologia de atendimento de emergên

cia com número limitado de equipes de atendimento. Esta metodologia aplicada ao sistema exemplo fornece uma visão global do sistema, indicando o subsistema que mais apresenta falhas.

A utilização do banco de dados de modo distinto ao utilizado segundo as normas do DNAEE contribuiu para obtenção de índices adicionais capazes de monitorar o desempenho do sistema em termos de velocidade de falha, (função do clima) e de reparo (técnicas de despacho).

Outras contribuições deste trabalho se constituíram na identificação das transições climáticas com o banco de dados e um método de obtenção de classes variáveis para validação das funções de densidade, no ajustamento de curvas.

6.3 - Sugestões para Futuros Trabalhos

Para continuação do trabalho desenvolvido, são feitas várias sugestões para realização de trabalhos desenvolvidos nesta mesma área:

- Análise de falha e reparo a nível de componente no Sistema de Distribuição.
- Técnica de esparsidade da matriz de taxas de transição no Método de Markov.
- Aperfeiçoamento no Banco de Dados com inclusão dos tempos de preparação de equipes e localização de falhas para aplicação da Teoria das Filas no Caso de reparos.

- Aperfeiçoamento do Banco de Dados com inclusão das condições Meteorológicas.
- Priorização na sequência de reparos e sua aplicação no cálculo das probabilidades de ocorrência dos estados e níveis de falha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |1| - SING, C. & REZA EBRAHIMIAN, M. - Non Markovian Models for Common Mode Failures in Transmission System, IEEE Transactions on Power Apparatus and System VOL PAS 101 Nº 6, Junho de 1982.
- |2| - BLAKE, I.F. - An Introduction to Applied Probability, University of Waterloo, Editora John Wiley & Sons.
- |3| - TOLEDO, G.L. & OVALLE, I.I. - Estatística Básica, Editora ATLAS.
- |4| - CAMARGO, C.C. DE B. - Cadeias de Markov aplicadas à Confiabilidade da Transmissão de Potência Elétrica. IV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.
- |5| - BILLINTON, R. - Transmission System Reliability Evaluation Using Markov Process, IEEE - Transactions on Power Apparatus and Systems VOL PAS 87 Nº 2, Fevereiro de 1968.
- |6| - ALKAIM, J.L. - Tratamento Estatístico das Indisponibilidades em Linhas de Transmissão, Dissertação de Mestrado - UFSC - 1981.
- |7| - SPIEGEL, M.R. - Estatística, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda.

- |8| - COSTA NETO, Estatística, Editora Edgard Blücher Ltda.
- |9| - LINDGREN. B.W. & Mc ELRATH G.W. - Introdução à Estatística, Editora Ao Livro Técnico S/A (Trad.).
- |10| - BILLINTON, R. - Power System Reliability Calculation, Editora MIT Press
- |11| - Coleção de Distribuição de Energia Elétrica, Planejamento de Sistemas de Distribuição, CAP I - CAMPUS / ELETROBRÁS.
- |12| - Coleção de Distribuição de Energia Elétrica, Desempenho de Sistemas de Distribuição, CAP III - CAMPUS / ELETROBRÁS.
- |13| - Coleção de Distribuição de Energia Elétrica, Manutenção e Operação de Sistemas de Distribuição, CAP IV CAMPUS/ELETROBRÁS.
- |14| - PAPOULIS, A. - Probability Random Variables e Stochastic Processes. Editora McGraw-Hill.
- |15| - BILLINTON, R. - Reliability Evaluation in Distribution and Transmission System, PROC IEE VOL 122 Nº 5, May, 1975.

- |16| - BILLINTON, R. - Distribution System Reliability Evaluation
IEEE TUTORIAL COURSE POWER SYSTEM EVALUATION, 1982.

- |17| - ALLAN, R.N. & HOMMER, I.R. - Modelling and Evaluating
the Reliability of Distribution System, IEEE
Transaction on PAS, VOL - PAS 98 Nº 6 NOV/DEC, 1979.

- |18| - CAMARGO, C.C. DE B. - Confiabilidade Aplicada a Siste
mas de Potência Elétrica, ELETROSUL.

- |19| - BILLINTON, R. & ALLAN, R.N. - Effect of Restricted Repair
on System Reliability Indices, IEEE - Transactions on
Reliability, VOL R - 27 Nº 5, Dec. 1978.

- |20| - BILLINTON, R. - Data Requirements for Composite System
Reliability Evaluation, Power System Research Group,
University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá.

- |21| - MOROZOWSKI FILHO, MARCIANO - SISTEMA CSP: Metodologia de Cál
culo dos Índices de Confiabilidade. NOTA TÉCNICA-DPS-ELETROSUL.

- |22| - STONE, G.C. & ROSEN, H. - Some Graphical Techniques for
Estimation Weibull Confidence Intervals, IEEE
Transactions on Reliability, VOL R - 33 Nº 5, Dec, 1984.

- |23| - KREYSZIG, E. - Advanced Engineering Mathematics. Wiley
International Edition.

- [24] - ELGERD, O. I. - Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica, Editora McGraw Hill.

A P Ê N D I C E I

MODELOS E FUNÇÕES PROBABILÍSTICAS APLICÁVEIS À CONFIABILIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

1 - Funções de Variáveis Aleatórias Contínuas

1.1 - Introdução

Sabendo que X é uma variável aleatória contínua com função densidade cumulativa ou função de distribuição $F_X(x)$, cuja derivada é:

$$F'_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x) = f_X(x) \quad (1.1)$$

e $f(x)$ também sendo função contínua, observa-se que a probabilidade de que X toma em um valor particular X_0 , deve ser zero desde que:

$$P(X = x_0) \leq P(x_0 \leq X \leq x_0 + \delta) = F_X(x_0 + \delta) - F_X(x_0),$$

para qualquer $\delta \geq 0$. Como $F_X(x)$ é contínua, o valor de δ pode ser escolhido tão pequeno como desejado.

Sendo $f_X(x)$ e $F_X(x)$ contínuos e $F_X(\infty) = 0$, através do cálculo elementar tem-se:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(y) dy \quad (1.2)$$

para qualquer intervalo entre a e b , a probabilidade X se situar neste intervalo é obtida por:

$$P(a < x < b) = \int_a^b f_X(y) dy \quad (1.3)$$

Foi assumido que $f_X(x)$ é contínua, por conveniência. Na realidade não é necessário que $f_X(x)$ seja contínua sempre. É somente necessário que a derivada $dF_X(x)/dx$ exista sempre, exceto para um intervalo finito de pontos que sua derivada nestes limites seja contínua.

A função $f_X(x)$ tem as seguintes propriedades, para garantir as condições acumuladas:

a) $f_X(x) > 0$

b) $\int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1$

c) $f_X(x)$ é contínua em partes

d) para qualquer intervalo (a, b) :

$$P(a < x < b) = \int_a^b f_X(x) dx$$

A função $f_x(x)$ é chamada FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE da variável aleatória X [2].

1.2 - Função Densidade Erlang Especial

A função densidade de probabilidade Erlang Especial é dada por:

$$f(t) = \frac{\lambda (\lambda t)^{\alpha-1} e^{-\lambda t}}{(\alpha - 1)!} \quad (1.4)$$

Onde:

α - parâmetro forma da distribuição (inteiro > 0).

λ - parâmetro escala.

$D = \frac{\alpha}{\lambda}$ - valor esperado de X .

Esta distribuição permite usar o esquema de estágios no estudo de processos de Markov [1] e pode ser usada para aproximar muitas distribuições de probabilidade.

Exemplificando, quando o valor de " α " é unitário esta função torna-se exponencial, da forma $f_t(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, quando o valor de " α " é em torno de 5 a função de Erlang Especial se aproxima da densidade normal. Com grandes valores para " α ", a distribuição representa períodos maiores com probabilidades tendendo a zero, o que representa o sistema estar fora de operação.

1.3 - Função Densidade Gamma

A variável aleatória t é dita ter distribuição Gamma se sua função densidade de probabilidade é da forma:

$$f(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} ; \alpha, \lambda > 0 \text{ e } t > 0 \quad (1.5)$$

Nesta expressão $\Gamma(\alpha)$ é a função Gamma, definida por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (1.6)$$

Integrando por partes:

$$\begin{aligned} \Gamma(\alpha) &= (\alpha-1) \Gamma(\alpha-1) \\ &= t^{\alpha-1} e^{-t} \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} (\alpha-1) e^{-t} t^{\alpha-2} dt \end{aligned}$$

Para qualquer valor de α , pode-se usar esta relação sucessivamente para escrever $\Gamma(\alpha)$ como:

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha-1) (\alpha-2) \dots (\alpha - (n-1)) \Gamma(1+x),$$

onde $\alpha = n + x$, n um inteiro e $0 \leq x \leq 1$.

Geralmente as aplicações desta função requerem valores de $\Gamma(y)$ para $1 \leq y < 2$, havendo tabelas para estes valo

res de função.

Sendo α um inteiro, sabe-se que $\Gamma(\alpha) = (\alpha-1)!$, recaindo-se na função Erlang Especial.

Sendo $\alpha = 1$, a função densidade de t é $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, $t \geq 0$ e $\lambda > 0$, ou seja, a função exponencial com parâmetro λ [2].

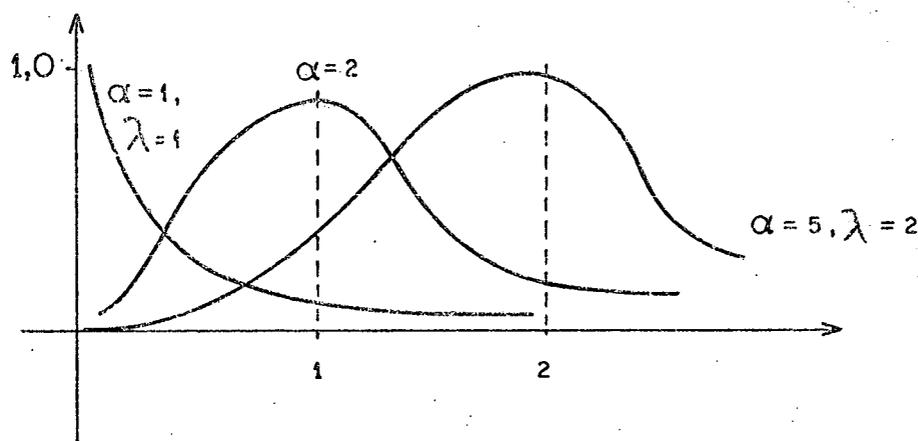


FIGURA 1 - Função Densidade Gamma.

1.4 - Função Densidade Weibull

A variável aleatória t é dita ter distribuição Weibull se sua função densidade de probabilidade é da forma:

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta} ; \lambda, \beta > 0, t \geq 0 \quad (1.7)$$

Quando $\beta = 1$, a função é exponencial com parâmetro λ . A natureza da função taxa de falha faz esta lei, particularmente usável, se, por exemplo, for desejado aproximar dados de

taxa de falhas |2|.

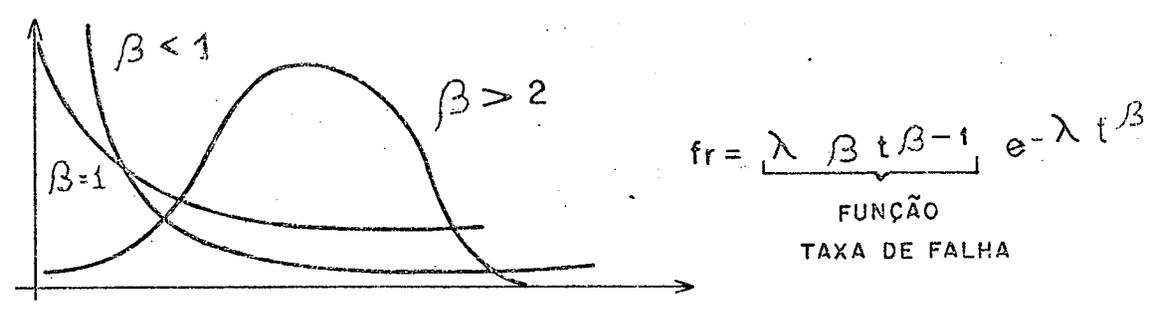


FIGURA 2 - Função Densidade Weibull.

1.5 - Função Exponencial

Uma variável aleatória contínua $0 \leq x < \infty$ possui uma função de distribuição exponencial quando ela for dada por:

$$F(t) = \begin{cases} P(x \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} & , 0 \leq t < \infty \\ 0 & , t < 0 \end{cases}$$

sendo λ uma constante positiva.

É um caso particular da função de distribuição de Poisson.

Verifica-se facilmente a natureza mono-paramétrica da distribuição exponencial. Conhecendo o valor de λ , a distribuição fica completamente especificada e a probabilidade de qual

quer evento de interesse pode ser calculada.

A função densidade de probabilidade é da forma:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-t\lambda}, & 0 \leq t < \infty \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

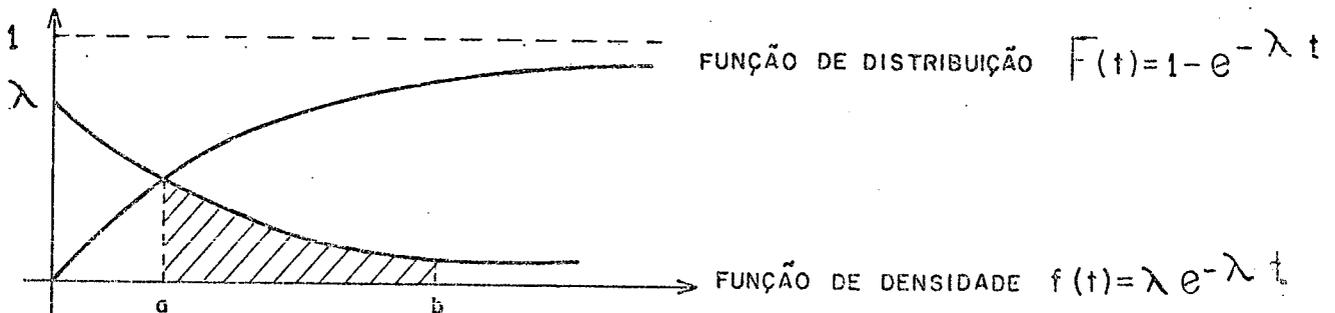


FIGURA 3 - Função Densidade de Probabilidade.

A média e a variância da variável aleatória X deste tipo de distribuição são, respectivamente:

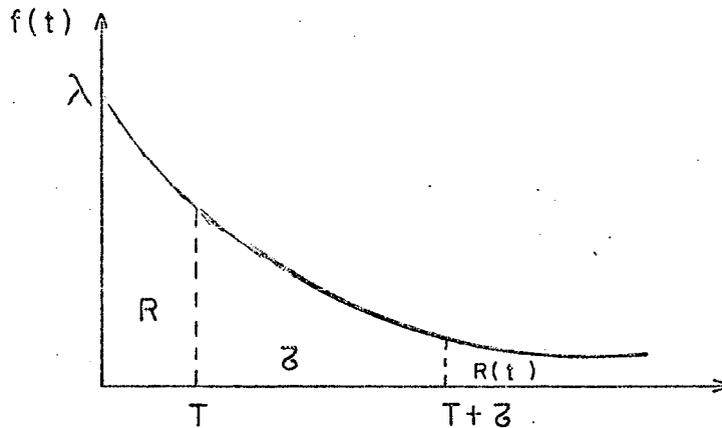
$$E(x) = \frac{1}{\lambda}, \quad V(x) = \frac{1}{\lambda^2}$$

Se X possuir uma distribuição exponencial e for interpretada como o tempo de vida de certo equipamento que já funciona há t horas, interessa saber a distribuição do tempo restante $X' = X - t$.

Prova-se que a distribuição do tempo de vida restante do equipamento não depende de quanto tempo ele já está operando. O equipamento simplesmente "esquece" seu passado e qual

quer falha no mesmo será repentina e ao acaso e não devido a deterioração gradual. A distribuição exponencial é a única que possui tal propriedade [4].

Assim, a função exponencial independe do tempo de operação anterior para λ constante.



$$R(T) = \int_T^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda T}$$

$$R(T + \zeta) = e^{-\lambda(T + \zeta)}$$

FIGURA 4 - Função Exponencial da Confiabilidade

Analisando a Figura 4, a probabilidade de sucesso até $T + \zeta$, dado que houve sucesso até T é:

$$P(A/B) = \frac{P(A \cup B)}{P(B)} \therefore \frac{R(T + \zeta)}{R(T)} = e^{-\lambda \zeta} = R(\zeta)$$

$$\text{Se } \lambda t \ll 1 \therefore e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t.$$

1.5 - Função Densidade Normal

A variável aleatória X é dita ser normalmente distribuída se ela tiver a fdp da seguinte forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \alpha < x < \alpha, \quad \sigma > 0 \quad (1.9)$$

Hã dois parâmetros μ , a média e σ , o desvio padrão. Vê-se que:

$$E(x) = \mu \quad e \quad V(x) = \sigma^2 \quad |2|.$$

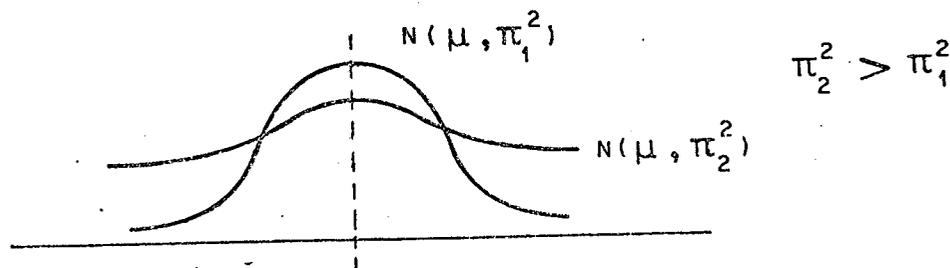


FIGURA 5 - Função Normal.

Observa-se que não há uma simples função dando a integral indefinida da equação (1.9). Se $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, então a função distribuição cumulativa de X é dada apenas pela integral:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy \quad (1.10)$$

Esta função é tabelada, mas não para todos valores de μ e σ . Para solucionar este problema, faz-se uma troca de variável na equação 1.10, para tabelar a função:

$$z = \frac{y - \mu}{\sigma}$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz \quad (1.11)$$

Esta função é a função densidade cumulativa ou de distribuição da variável aleatória normal com média ZERO e variância UM e Z é chamada VARIÁVEL ALEATÓRIA NORMAL PADRÃO.

Combinando as equações acima, tem-se:

$$F(x) = P(X = t) = \phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right) \quad (1.12)$$

2 - Método de Máxima Verossimilhança para Estimar Parâmetros

Em funções de distribuição aparecem constantes chamadas de PARÂMETROS, p.e, α na função ERLANG ESPECIAL, λ e β na função WEIBULL, σ na função NORMAL, etc. Uma tarefa freqüente na análise estatística é obter valores aproximados de tais parâmetros, para que os dados sigam a respectiva função. Esta tarefa é chamada de ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS [24].

Estimativas com propriedades estatísticas melhores são obtidas usando o método de máxima verossimilhança [23].

2.1 - Descrição do Método

Dada $f(x, \mu)$ com n amostras, obtém-se

$$l = f(x_1, \mu) \cdot f(x_2, \mu) \cdot f(x_3, \mu) \dots f(x_n, \mu) \quad (1.13)$$

Esta função é chamada de VEROSSIMILHANÇA e é para funções discretas.

Para funções contínuas, a probabilidade da amostra consiste em intervalos pequenos: $x_1 \leq x \leq x_1 + \Delta x$. Multiplicando 1.13 por Δx , tem-se:

$$l \cdot (\Delta x)^n = f(x_1, \mu) \cdot \Delta x \cdot f(x_2, \mu) \cdot \Delta x \dots f(x_n, \mu) \Delta x \quad (1.14)$$

O valor de μ é calculado através da maximização de l , ou seja:

$$\frac{\partial l}{\partial \mu} = 0$$

Pode-se igualmente obter μ através de

$$\ln l = \ln f(x_1, \mu) + \ln f(x_2, \mu) + \dots + \ln f(x_n, \mu) \quad \text{já que}$$

l ou $\ln l$ são relacionadas monotonicamente, desde que $f \geq 0$.

Neste caso μ é obtido por:

$$\frac{\partial \ln l}{\partial \mu} = 0$$

onde μ pode ser um vetor de diversos parâmetros.

2.2 - Exemplo

Seja a função Weibull:

$$f(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta}$$

$$\ln f(t) = \ln \lambda + \ln \beta + (\beta-1) \ln t - \lambda t^\beta$$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \beta} = \frac{1}{\beta} + \ln t - \lambda t^\beta \ln \beta = 0$$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \lambda} = \frac{1}{\lambda} - t^\beta = 0$$

A solução deste par de equações não-lineares pode ser obtida via Newton-Raphson.

3 - Utilização da Função Qui-Quadrado para Teste de Aderência

Como os resultados obtidos por amostragem nem sempre coincidem exatamente com os resultados teóricos esperados, é necessário saber a diferença dos resultados observados e esperados. Na prática, as frequências esperadas são calculadas com base em uma hipótese H_0 , usando determinada distribuição estatística. Os resultados observados são aplicados para verificar se a hipótese H_0 é válida ou deverá ser rejeitada, isto é, se a distribui

ção é aderente aos resultados observados [17].

3.1 - A Função Qui-Quadrado (χ^2)

É usada para verificar a aderência das funções distribuição, isto é, para determinar quão aproximadamente as distribuições teóricas, como NORMAL, EXPONENCIAL, WEIBULL, etc., se ajustam a distribuições empíricas que são obtidas por meio de dados amostrais.

Na prática, efetua-se o teste de χ^2 da seguinte maneira: supõe-se uma determinada hipótese H_0 e calculam-se as frequências esperadas segundo a distribuição indicada e a função qui-quadrado. Compara-se o χ^2 calculado com χ^2 tabelado, para determinado nível de confiança. Se o χ^2 calculado for maior que o χ^2 tabelado, a hipótese inicial é rejeitada ao nível de significância especificado [8].

3.1.1 - Definição χ^2

Uma medida de discrepância entre as frequências observadas e esperadas é proporcionada pela estatística χ^2 , expressa por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{O_i - e_i}{e_i} \right)^2, \text{ onde:} \quad (1.15)$$

O_i - frequência observada

e_i - frequência esperada

N - frequência Total $\therefore N = \sum O_i = \sum e_i$

Quanto maior o valor do χ^2 , maior a discrepância entre as frequências observadas e esperadas. Sendo $\chi^2 = 0$, as frequências teóricas ou esperadas e as observadas concordam exatamente.

3.1.2 - Graus de Liberdade (ν)

O número de graus de liberdade será igual ao número de classes menos um.

Este conceito é para quando as frequências esperadas sejam calculadas, sem que se façam estimativas dos parâmetros populacionais a partir de estatísticas amostrais.

3.2 - Teste de Significância

As frequências esperadas são calculadas com base em uma hipótese H_0 . Se, para esta hipótese, o valor do χ^2 calculado for maior que alguns valores críticos (como $\chi_{0,95}^2$ ou $\chi_{0,99}^2$, que são valores críticos nos níveis de significância 0.05 e 0.01, respectivamente) conclui-se que as frequências observadas diferem das esperadas de modo significativo e rejeita-se H_0 , no nível de significância correspondente. Caso contrário, aceita-se, pelo menos não se rejeita a hipótese. Este processo é denominado TESTE DO QUI-QUADRADO DA HIPÓTESE OU SIGNIFICÂNCIA [8].

4 - Distribuição de Frequência

O estudo de um determinado fenômeno requer a coleta de uma grande massa de dados numéricos, difícil de ser tratada se esses dados não forem organizados e condensados em uma tabela. A apresentação desses dados através de tabelas em que aparecem valores distintos um do outro favorece uma análise e interpretação mais rápida da natureza e comportamento do fenômeno observado |3|.

4.1 - Dados Brutos

Após a coleta os dados originais não se encontram prontos para análise, por não estarem numericamente organizados. São chamados DADOS BRUTOS.

4.2 - ROL

É uma lista que os valores estão dispostos em uma determinada ordem crescente ou decrescente.

4.3 - Tabelas de Frequência

São representações, nas quais os valores se apresentam com suas repetições, evitando que elas apareçam mais de uma vez na tabela como ocorre no Rol.

O número de observações ou repetições de um valor ou de uma modalidade em um levantamento qualquer é chamado de frequência desse valor ou modalidade.

As tabelas de frequência representam tanto valores individuais como valores agrupados em classe.

No caso específico, usa-se a tabela de frequência com valores agrupados em classe. A distribuição de frequência de dados agrupados em classe resume os dados originais, sendo o tempo a variável do estudo. Esta variável é contínua.

4.4 - Elemento de Uma Distribuição de Frequência

4.4.1 - Frequência Simples Absoluta (f_i)

É o número de observações correspondentes a essa classe ou a esse valor.

4.4.2 - Amplitude Total (A_t)

É a diferença entre o maior e o menor valor observado.

4.4.3 - Classe

É cada um dos grupos de valores em que se subdivide a amplitude total do conjunto de valores observados da variável. O número de classes em uma distribuição de frequências é representado por K . É importante que a distribuição conte com um número adequado de classes. Se o número for escasso, os dados originais ficarão tão comprimidos que pouca informação se poderá extrair da tabela. Por outro lado, se forem utilizadas muitas classes, haverá classes com frequências nulas ou muito pequenas e o re

sultado será uma distribuição irregular e prejudicial à interpretação do fenômeno.

O método mais utilizado para determinação do número de classes é o MÉTODO DE STURGES:

$$K = 1 + 3.3 * \log_{10} N, \text{ onde} \quad (1.16)$$

K - número de classes

N - número total de observações

Este método apresenta um grande inconveniente, exemplificado a seguir:

a) Número de observações (N) = 500

$$K = 1 + 3.3 * \log_{10} 50 = 9.907 \therefore K = 10$$

b) Número de observações (N) = 50

$$K = 1 + 3.3 * \log_{10} 50 = 6.606 \therefore K = 7$$

Nota-se que para um número pequeno de observações, há um grande número de classes e relativamente poucas classes para um grande número de observações.

Kelley sugere os seguintes números de classes |3|:

N	5	10	25	50	100	200	≥	500
K	2	4	6	8	10	12		15

4.4.4 - Amplitude do Intervalo de Classe

É o comprimento da classe, sendo geralmente definida como a diferença entre seus limites superior e inferior.

4.4.5 - Ponto Médio da Classe (X_j)

É o valor que representa a classe para efeitos de cálculo de certas medidas. Na distribuição de frequência com valores agrupados em classes, considera-se que os resultados incluídos em cada classe distribuem-se uniformemente por seus intervalos.

4.5 - Tipos de Frequência

4.5.1 - Frequência Simples Absoluta (f_j)

É o número de repetições de um valor individual ou de uma classe de valores da variável.

$$\sum_{j=1}^k f_j = N \quad (1.17)$$

4.5.2 - Frequência Simples Relativa (f_{rj})

É a proporção de observações de um valor individual ou de uma classe, em relação ao número total de observações. É, portanto um número relativo.

$$fr_j = \frac{f_j}{\sum_{j=1}^k f_j} = \frac{f_j}{N} \quad (1.18)$$

4.5.3 - Frequência Acumulada Absoluta

A frequência acumulada de uma classe ou um valor absoluto é a soma das frequências simples das classes ou valores anteriores ou posteriores da classe.

4.5.4 - Frequência Acumulada Relativa

É a soma das frequências simples relativas dessa classe com as frequências relativas as classes anteriores ou posteriores, respectivamente para "ABAIXO DE" ou "ACIMA DE".

4.6 - Classes Variáveis

São classes redefinidas, cujo tamanho varia conforme a razão dos valores contidos de frequência e um valor máximo de frequência pré-estabelecido. Seu detalhamento é descrito no Apêndice II, descrição do programa que usa a redefinição de classes.

A P Ê N D I C E II

DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DE DADOS DO PROGRAMA DE ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E DURAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES1 - Descrição do Programa

O programa faz um ajustamento de curvas a partir dos dados agrupados, por intervalos de duração das interrupções ou operação, ou seja, duração para reparo e para falhas respectivamente, montando uma tabela de frequência por duração. O número de classes é calculado usando o MÉTODO DE STURGES.

Os dados são falhas, reparos ou concentração de falhas.

O ajustamento de curva se desenvolve da seguinte maneira: calcula-se o valor esperado a partir do observado por intervalos de duração e após há um teste de aderência à curva pré-estabelecida usando a função χ^2 . Se a hipótese for desonesta, há um reagrupamento de dados em nova classe, segundo uma metodologia nova descrita a seguir, havendo um novo teste de aderência.

O clima é outro dado importante, podendo ser: BOM, ADVERSO ou QUALQUER (neste caso desconsidera-se seu efeito).

1.1 - Classes Variáveis

Como os critérios de determinação do número de classes são um pouco subjetivos e dependem da natureza dos dados e da unidade de medida em que foram expressos, no programa de ANÁ

LISE DE FREQUÊNCIA E DURAÇÃO foi definido e desenvolvido um algoritmo que possibilite a redefinição de classes, tendo estas sido previamente definidas pelo MÉTODO DE STURGES.

O método de redefinição de classe é descrito a seguir:

O tamanho da classe da classe varia segundo o número de observações, já estabelecidas por STURGES, sendo que a máxima frequência por classe é um dado de entrada do programa. A relação entre observações por classe e a máxima frequência por classe define o número de novas classes dentro da classe definida previamente. Se esta relação for menor que 0,5, a classe permanece do mesmo tamanho de intervalo definido no método de STURGES, caso contrário esta relação irá definir o número de classes, dentro da classe definida anteriormente, nas quais as observações são reagrupadas novamente.

Opcionalmente, a classe pode ficar automaticamente agregada à classe que a antecedeu, se através do método de STURGES não houver nenhuma observação contida nela.

1.2 - Estimativa de Parâmetros

Para estimar os parâmetros das funções distribuição foi usado o método da Máxima Verossimilhança, sendo desenvolvidas rotinas para tal.

Na função de distribuição Weibull, a rotina baseou-se no desenvolvimento da função, aqui descrita:

$$f(t) = \left(\frac{1}{\alpha}\right)^\beta \beta t^{\beta-1} e^{-\frac{t}{\alpha}^\beta}, \quad \lambda = \left(\frac{1}{\alpha}\right)^\beta$$

$$\ln f(t) = \beta \ln \left(\frac{1}{\alpha}\right) + \ln \beta + (\beta - 1) \ln t - \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \beta} = \ln \left(\frac{1}{\alpha}\right) + \frac{1}{\beta} + \ln t - \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \ln \left(\frac{t}{\alpha}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \ln f}{\partial \beta^2} = -\left(\frac{1}{\beta^2}\right) - \left(\frac{1}{\alpha}\right)^\beta t^\beta \ln t$$

Sendo $F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta} \therefore$

$$\ln F(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta,$$

$$\frac{\partial \ln F}{\partial \beta} = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \ln \left(\frac{t}{\alpha}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \ln F}{\partial \beta^2} = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \left[\ln \left(\frac{t}{\alpha}\right) \right]^2$$

Considerando todas as ocorrências r , aplicando a técnica de Máximo Verossimilhança, descrita no Apêndice I, tem-se:

$$\ln \ell = \sum_{i=1}^r \ln F(t_i) = \sum_{i=1}^r \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta},$$

$$\frac{\partial \ln \ell}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^r \frac{\partial \ln F(t_i)}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^r \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta} \ln \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \ln \ell}{\partial \beta^2} = \sum_{i=1}^r \frac{\partial^2 \ln F(t_i)}{\partial \beta^2} = \sum_{i=1}^r \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta} \ln^2 \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)$$

$$F = \frac{\partial \ln \ell / \partial \beta}{\ln \ell} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln \frac{t_i}{\alpha}$$

$$F' = \frac{\sum_{i=1}^r \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta} \ln \frac{t_i}{\alpha}}{\sum_{i=1}^r \frac{t_i}{\alpha}} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln \frac{t_i}{\alpha}$$

$$F'' = \frac{\partial^2 \ln f}{\partial \beta^2} = \frac{\partial \ln F}{\partial \beta} + \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 = \ln^2 \frac{t_i}{\alpha} = \left[\sum_{i=1}^r \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta} \ln \frac{t_i}{\alpha} \right]^2 + \left(\frac{1}{\beta} \right)^2$$

Para maximizar a função de Verossimilhança $\ln L$ utiliza-se o método de Newton-Raphson obtendo-se β através da relação

$$\beta_i = \beta_{i-1} - \frac{F'}{F''}$$

O parâmetro α pode ser obtido através da relação:

$$\alpha = t_m^{1/\beta}, \text{ onde}$$

t_m - é o tempo médio de ocorrência.

A partir desse raciocínio foi desenvolvido a rotina de estimação dos parâmetros β e α .

Não foi aplicado o método de Verossimilhança para as funções Gamma e Erlang Especial, pois a fórmula requeria tabelas de derivadas primeira e segunda da função Gamma. Em consequência adotou-se o método de busca por tentativas.

2 - Manual de Entrada de Dados do Programa

Os dados necessários a este programa são enumerados a seguir e dependem do tipo da função a se ajustar e do tipo de análise que se deseja:

SUBESTAÇÃO EM ESTUDO

COL 1 a 5 Numérico ajustado à direita.

CLIMA

COL 6 - 10

- CLIMA = \emptyset - qualquer clima
 = 1 - clima normal
 = 2 - clima adverso

TIPO DE FUNÇÃO

COL 11 a 15

- TIPO-FUNC = 1 - exponencial
 = 2 - Erlang Especial
 = 3 - normal
 = 4 - Weibull
 = 5 - Gamma

PERCENTIS -- área da curva para análise do x^2

COL 17 a 21

TEMPO MÉDIO

TIPO DE ANÁLISE FEITO

COL 23 - 26

- = MTTF - Falha
 = MTTR - reparo
 = " " - concentração de falhas

DELTA - parcela para integração por partes

COL 28 - 33

MÁXIMO - VALOR - CLASSE - maior frequência por classe na redefinição de classe

COL 35 - 39

EXCLUI - MANOBRA - indica exclusão de interrupções COL 41

com tempo menor ou igual ao tempo de manobra.

- = 1 - Análise de Interrupções maiores que o TM.

= \emptyset - Análise com todas as interrupções.

TEMPO DE MANOBRA - quando há exclusão de interrupções por manobra e este tempo difere de 3 minutos.

COL 43 - 47

AGREGA - CLASSE - indica agregação de classes com frequências zero.

COL 48

Na análise de concentração de falhas (failure bunching) devem ser dadas as duas subestações em que se deseja esta análise.

NSE 1 - COL 49 - 53

NSE 2 - COL 54 - 58

Se a função não for exponencial (tipo 1) o programa requisita mais dados.

A duração média de falha/reparo é também um parâmetro, podendo variar, sendo um dado lido. Se seu valor é ZERO, ela será calculada no programa. Este valor é lido no segundo cartão de dados, é numérico, decimal com cinco (5) casas após a vírgula, colunas 1 a 10 ajustados à direita.

Para as funções Erlang Especial, Gamma e Weibull, há um terceiro cartão, onde são lidos seus respectivos parâmetros. Para Erlang e Gamma é lido o número de parâmetros para análise seguida dos parâmetros e para a função Weibull é lido um parâmetro inicial para estimar seu valor aproximado. Neste caso o número de parâmetros não é lido.

CARTÃO 3

Número de Parâmetros

COL 1 a 3

Parâmetro 1	COL 5 a 10
Parâmetro 2	COL 11 a 16

O número de parâmetros é um número inteiro, ajustado a direita, e os parâmetros são decimais com 4 (quatro) casas após a vírgula.

Quando a função de distribuição é Weibull, o cartão 3 só será preenchido com o valor inicial de β nas COL 5 -10.

Há algumas considerações a serem feitas:

- 1 - É necessário escolher previamente o tipo de taxa a analisar.
- 2 - É necessário verificar o valor máximo da classe que se deseja, para que se não houver aderência, o programa recorra à rotina de redefinição de classes.
- 3 - As tabelas de χ^2 e Gamma estão contidas no programa e foram retiradas da ref. |3|.

A P Ê N D I C E III

DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DE DADOS DO PROGRAMA DE DETERMINAÇÃO DE TAXAS DE TRANSIÇÕES CLIMÁTICAS, FALHA E REPARO1 - Descrição

Este programa calcula as taxas de transições das subestações ou do sistema todo, conforme necessidade do analista.

A leitura dos dados de interrupção é feita a partir de um arquivo de dados, verifica-se o clima e faz-se um somatório de frequência e duração de interrupções por clima e no total.

As transições climáticas são contadas, quando o clima torna-se adverso e nesta fase contam-se os dias em que o sistema esteve sujeito a tempo bom. O cálculo é feito pela subtração do último dia desta transição menos o primeiro dia da mesma acrescido a unidade, como é mostrado a seguir:

DIAS EM TEMPO BOM = ÚLTIMO DIA NA TRANSIÇÃO i - PRIMEIRO DIA NA TRANSIÇÃO $i + 1$.

O tempo adverso é calculado lendo todas interrupções em tempo adverso, sem transições e é igual à subtração da hora da última interrupção em tempo adverso e a hora da primeira interrupção neste mesmo tipo de clima e o tempo bom é calculado subtraindo o tempo adverso do tempo total de análise dos dados.

Os dados devem ser classificados por data e clima.

Os cálculos das durações médias em tempo bom e adverso e as taxas de falha e reparo em tempo bom e adverso são feitos após a leitura do arquivo de dados. Também são calculadas as durações médias de operação em condições normais e adversas e suas taxas de transição e retorno para clima bom.

2 - Manual da Entrada de Dados

SUBESTAÇÃO EM ESTUDO

COL 1 a 3

NSE = \emptyset - Todas Subestações do Sistema.

NSE = N - Subestação N

PERÍODO A SER ESTUDADO

COL 4 a 8

O período a ser estudado é dado em dias.

A P Ê N D I C E IV

DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DE DADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO DAS
PROBABILIDADES DE PERMANÊNCIAS NOS ESTADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE MARKOV

1 - Descrição

O programa que aplica o modelo de Markov descrito no Capítulo III e exemplificado no Capítulo V tem como dados: tipo de aplicação, número de estados, número de caminhos; para cada estado os subsistemas envolvidos, o clima e para cada caminho, seu início e fim. As taxas de falha e reparo para todo tipo de clima de cada subsistema e as taxas de transições climáticas são lidos no início, como primeiro passo.

A matriz de transição A, que é a matriz das taxas de transição é montada a partir de:

$$A_{ij} = |a_{ij}|_{i \neq j} \quad \text{e para}$$

$$i = j \quad A_{ij} = - \sum_{i \neq j} a_{ij}$$

Este programa tem dois tipos de aplicação; o primeiro é o Modelo de Markov Simples, quando há transições climáticas, o segundo é o Modelo de Markov para reparos. As rotinas que montam a matriz A diferem conforme o tipo de aplicação escolhido pelo analista.

O programa oferece a opção de aplicar Markov em

Regime Permanente e/ou Transitório.

No Regime Permanente, o programa usa o método de inversão de matrizes de Shipley, após trocar uma das linhas da matriz pelo vetor $[1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]$, que corresponde ao balanço das probabilidades $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$, já comentado no Capítulo II.

As probabilidades de permanência nos estados são dadas pelo produto da inversa da matriz A e o vetor $R [0 \ 0 \ \dots \ 1]$.

No Regime Transitório, o método usado é o Método de Runge-Kutta. Neste caso, deve ser fornecido o passo de cálculo, valor inicial e final da variável independente (tempo).

As funções que definem as derivadas são dadas pelas equações formadas pela matriz de transição dos estados.

Quando o passo de integração não for fornecido, o programa calcula-o através de uma análise das taxas de transição. Ele será uma fração do inverso da maior das taxas.

O programa apresenta um gráfico das curvas de probabilidades nos passos de integração. Calcula também a frequência de mudança de estado e duração média de permanência nos estados.

No caso do estudo do Modelo de Markov com restrições de equipes de reparo, as frequências de mudança de estado e durações médias de permanência são calculadas em relação ao seu nível de falha.

2 - Manual de Entrada de Dados

2.1 - Dados Iniciais

TIPO DE APLICAÇÃO

COL 1 - 3

= REP

- Markov com reparos

	= " " -	Markov Simples	
OPÇÃO REGIME			COL 5 - 6
	= T -	R. Transitório	
	= R -	R. Permanente	
	= TR -	Transitório e Permanente	
NÚMERO DE ESTADOS			COL 8 - 10
NÚMERO DE CAMINHOS			COL 12 - 14
NÚMERO DE SISTEMAS			COL 16 - 18
TIPO DE REPARO			COL 20
	= I -	Reparo Irrestrito	
	= R -	Reparo Restrito	
NÚMERO DE FALHAS			COL 22 - 24

Sendo o Modelo de Markov com reparos, esta variável indica o número de níveis de falha que o sistema comporta.

2.2 - Taxas do Sistema

Os dados lidos a seguir são as taxas dos sistema. Sendo o modelo Markoviano com reparos, as taxas de transição climática e a taxa de falha comum são nulas.

A seguir são lidas as taxas em separado dos subsistemas. Os dados são descritos, a seguir:

NÚMERO DA SUBESTAÇÃO	- COL 1 - 3
TAXA DE FALHA EM TEMPO BOM (λ)	- COL 5 - 15
TAXA DE REPARO EM TEMPO BOM (μ)	- COL 17 - 27
TAXA DE FALHA EM TEMPO ADVERSO (λ')	- COL 29 - 39
TAXA DE REPARO EM TEMPO ADVERSO (μ')	- COL 41 - 51
TAXA MÉDIA DE FALHA (λ_{med})	- COL 53 - 63
TAXA MÉDIA DE REPARO (μ_{med})	- COL 65 - 75

As taxas de falha e reparo citadas acima são numéricos, ajustados à direita com sete (7) casas após a vírgula.

2.3 - Dados de Estado

Os dados de cada estado são definidos a seguir:

ESTADO - Número do estado.	COL 1 - 3
NOME DO ESTADO -	COL 5 - 25
INDICADOR DE FALHA - indica se o estado é falho.	COL 27
INDICADOR DE REPARO - indica se o estado está sendo reparado.	COL 29
NÍVEL DE FALHA - Número de falhas que o estado possui.	COL 31

SUBESTAÇÃO EM ESTUDO NO ESTADO	COL 33 - 35
TAXA - OPERAÇÃO = 1	COL 37
SAÍDA = 0	
CLIMA - Quando há transição climática = 1	

2.4 - Dados de Caminho

NÚMERO DO CAMINHO	COL 1 - 3
ESTADO INICIAL	COL 5 - 7
ESTADO FINAL	COL 9 - 11
TIPO DE TAXA - Usado para Modelo Markoviano Simples	COL 13 - 15
= TFR - Taxa Falha/Reparo	
= TTC - Taxa Transição Climática	
= TMC - Taxa de Falha de Modo Co mum.	

CONSTANTE A SE MULTIPLICAR A TAXA DE FALHA
COL 17

CONSTANTE A SE MULTIPLICAR A TAXA DE REPARO
COL 19

Estas duas últimas variáveis multiplicam as taxas no Modelo Markoviano com Reparos, pois a medida que os níveis aumentam a uma duplicação, triplicação, etc., das taxas.

Quando se deseja o Regime Transitório o programa exige os seguintes dados:

PASSO DE INTEGRAÇÃO	COL 1 - 9
VALOR INICIAL VAR. INDEPENDENTE	COL 10 - 18
VALOR FINAL VAR. INDEPENDENTE	COL 19 - 27

Estas três variáveis são numéricas, ajustadas à direita com quatro (4) casas após a vírgula.

A P Ê N D I C E V

DESCRIÇÃO E MANUAL DE ENTRADA DE DADOS
DO PROGRAMA DE CÁLCULO DE MÉDIAS MÓVEIS1 - Descrição

Este programa faz uma análise das taxas de falha, verificando como se comportam as interrupções ao decorrer do período em estudo. Os dados de interrupção devem estar classificados por data, clima e subsistema.

Há três tipos de análise, com médias móveis, com médias acumuladas e com médias sobrepostas de durações de interrupção, podendo ser distinguido o tipo de clima desejado.

O primeiro passo do programa é a leitura dos dados de interrupção, selecionando os registros de interesse para análise em relação a interrupções com ou sem manobra e a subsistemas. Após calcula o tempo médio de falha que para clima adverso é calculado do modo diferente do que para qualquer clima e clima bom.

Para calcular o tempo médio de falha o programa testa, para cada registro lido, o tipo de média a ser analisado, verificando o mês da interrupção.

O cálculo das taxas de falha em relação aos três diferentes tipos de media diferem um pouco. Para médias móveis, a cada ciclo que corresponde ao número de meses considerados nos dados de entrada, há um cálculo de taxa de falha correspondente, inicializando-se a frequência e duração, variáveis auxiliares, calculadas. Para médias acumuladas vale a mesma definição, porém não

há inicialização destas variáveis, sendo elas acumuladas aos de correr do período.

Para as médias de duração de falha sobrepostas, de ve-se ter como dados iniciais o tamanho do ciclo e o número de me ses a se iniciar o processo novamente. Ao fim de cada ciclo calcu lam-se as taxas de falhas, porém a sua soma de frequência e dura ção antecedeu no número de meses lido para sobrepor as médias cal culadas.

Exemplo:

Sendo o ciclo de cálculo para taxas igual a qua tro (4) meses e o início para o somatório das médias sobrepostas igual a três, tem-se:

- MÊS 0 - início da contagem de frequência e dura ção.
- MÊS 3 - início da contagem para frequência e du ração das médias sobrepostas para o se gundo ciclo.
- MÊS 4 (FINAL) - Cálculo das taxas. Inicializa variáveis sobrepostas e guarda os valores calcu lados a partir do mês 3 nas variáveis prin cipais.
- MÊS 6 - início da contagem de frequência e dura ção para os cálculos das médias sobre postas no terceiro ciclo.

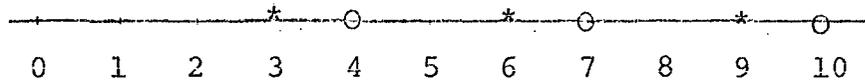
MÊS 7 (FINAL) - cálculo das taxas. Inicialização e valores armazenados.

MÊS 9

MÊS 10

O - Mês de Cálculo de Taxas

* - Mês de Início de Soma de Variáveis Auxiliares



2 - Manual de Entrada de Dados

SUBESTAÇÃO COL 1 - 4

= 0 TODO SISTEMA

= N SUBESTAÇÃO N

TIPO DE MÉDIA COL 6 - 7

NÚMERO DE MESES DO CICLO PARA CÁLCULO DE MÉDIAS COL 9 - 10

NÚMERO DO ANO QUE SE INÍCIA A ANÁLISE COL 12 - 13

NÚMERO DO MÊS ANTERIOR PARA SOMATÓRIO DAS
FREQUÊNCIAS E DURAÇÃO SOBREPOSTAS COL 15 - 16

CLIMA

COL 18 - 19

- = Ø - qualquer clima
- = 1 - clima normal
- = 2 - clima adverso

INDICADOR DE EXTINÇÃO DE INTERRUPÇÕES POR MANOBRA. COL 21

- = Ø - análise das interrupções independente
das manobras.
- = 1 - análise sem interrupções para manobra.

TEMPO DE MANOBRA

COL 23 - 26

Estando setada a variável acima o programa desconsidera as interrupções com tempo menor que o tempo de manobra.

A P Ê N D I C E VI

BANCO DE DADOS DE FALHAS E REPAROS EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA1 - Introdução

O Banco de Dados de Falhas ou Reparos (ou Banco de Interrupções) consiste no armazenamento de todas informações que se obtêm sobre ocorrências na operação de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

O comportamento do sistema é definido pelo cálculo de índices através dos dados estatísticos armazenados neste banco, que por meios computacionais, possui o controle centralizado de dados, devido à necessidade de operação e manutenção de grande volume de dados existentes.

Será descrito, neste Capítulo, o Banco de Dados de Ocorrências e o da Rede de Distribuição de Energia Elétrica da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE-RS), que este trabalho toma como exemplo. As interrupções ocorridas em PORTO ALEGRE RS no biênio 1983 - 1984 estão gravadas no banco de dados e a diretiz de formação será apresentada a seguir.

2 - Etapas para Formação do Banco de Dados de Interrupções

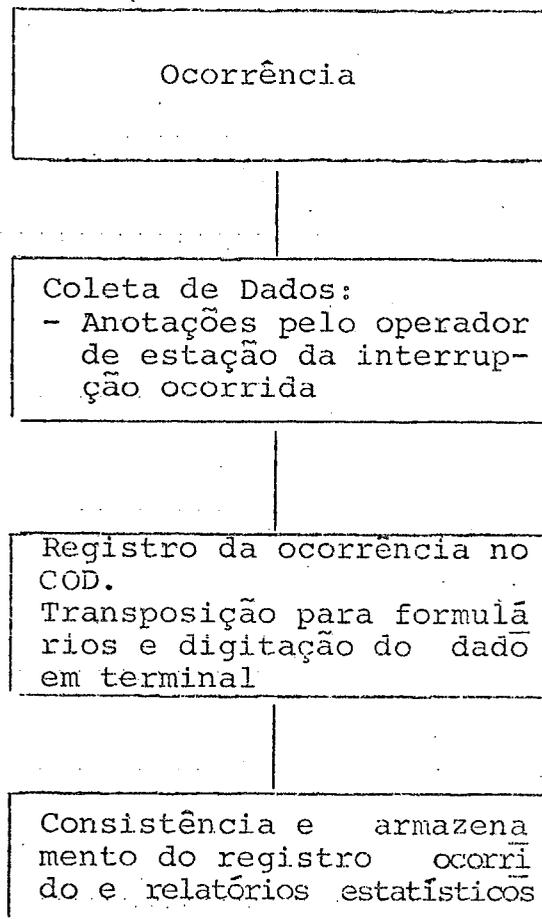
Para o banco de dados ser formado, etapa final do arquivamento dos dados, há um conjunto de etapas a ser seguido, e

um grande número de pessoas envolvidas. A definição destas etapas implica em um fluxo bem definido de informações que serão responsáveis pelo gerenciamento do sistema [6].

As etapas de formação desse banco seguem o modelo que a maioria das concessionárias de Energia Elétrica adotam:

- 1 - Os dados primários usados na análise e registro da ocorrência são coletados por operadores das estações, que estão juntos ao local do evento. Eles registram as observações necessárias dentro dos critérios determinados pelos procedimentos operativos.
- 2 - As ocorrências registradas são enviadas ao Setor de Operação da Distribuição, e os dados são transportados para os formulários próprios e digitados em terminal de vídeo.
- 3 - Após as etapas acima, será rodado o programa de consistência e armazenamento dos dados do Banco retirando os relatórios estatísticos necessários.

O fluxo abaixo descreve sucintamente as etapas de formação do Banco de Dados:



3 - Estrutura do Banco de Dados

A estrutura do Banco de Dados envolve todo o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, desde a subestação até o equipamento ligado ao ponto notável do alimentador. Para análise estatística é necessário ter conhecimento de toda estrutura rede em questão.

3.1 - Descrição do Sistema

Inicialmente é feito um levantamento de campo onde são colhidos e lançados em planta todos os dados que caracterizam as condições em que se encontra a rede, especificando os seus elementos e sua localização geográfica.

O sistema que se divide em subestação, alimentadores, pontos notáveis (trechos do alimentador) e equipamentos, possui os seguintes dados:

- Subestação

Potência, Número e Nome da Subestação,

Impedância dos transformadores, total de alimentadores.

- Alimentador

Classe de tensão

Condutores

Fator de Carga

Fator de Potência

Pontos Notáveis

Os pontos notáveis são caracterizados por postos de mudança de tensão, equipamentos (reguladores, chaves, capacitores, religadores), mudanças de bitola de condutor, número de fases, postos de derivação, mudança de direção, pontos de geração e posto de transformação. Todo posto de transformação define um circuito que contém vários consumidores em baixa tensão (BT) ou

apenas um consumidor em alta tensão (AT).

3.2 - Armazenamento dos Dados

Os dados de implantação e atualização do sistema, antes de serem armazenados, passam por um processo de depuração, através de programas de consistência.

O meio utilizado para armazenamento dos dados será em arquivos magnéticos (Discos IBM-3350/3375), sobre o que será criado o banco de dados da rede primária e das interrupções.

O grande volume de informações exigirá uma organização dos arquivos magnéticos adequada para seu armazenamento e uma escolha cuidadosa dos métodos para seu acesso. A utilização destes dados em bancos, sem necessidade de reprodução dos arquivos, facilita mantê-los atualizados. O gerenciamento e operação sobre o Banco de Dados requer um Software poderoso, para agilizar seu uso. No caso exemplo foi usado IMS (INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM) da IBM.

A utilização de arquivos por diversos sistemas exige a fixação e padronização de dados e critérios, pois uma pequena alteração em algum código afetaria todos os sistemas envolvidos.

Os vínculos lógicos existentes no banco de dados estabelecem relações entre todos os dados do sistema.

Essa organização dos bancos de dados minimiza a redundância das informações, facilita sua atualização e possibilita a expansão sem prejuízo da sua estrutura modular.

4 - Registro de Ocorrências de Falhas do Sistema

As interrupções têm, no fornecimento de energia algumas vezes, origem em falhas nos sistemas de geração e transmissão, mas os mais freqüentes decorrem de falhas no próprio sistema de distribuição, pois este é muito mais extenso quanto ao número de elementos passíveis de defeitos e acidentes.

O desconhecimento da situação físico-elétrica real das redes de distribuição impede que sejam antevistos e corrigidos dos problemas possíveis como:

- Sobrecarga de Transformadores

O incremento de carga solicitada a um transformador de distribuição faz com que sua capacidade seja excedida, trazendo danos físicos e em consequência paralização do seu funcionamento.

- Curto-Circuito

O desequilíbrio de cargas nas fases, principalmente nas redes secundárias (baixa tensão), ocasionado pela ligação não orientada de novas instalações, faz o condutor da fase sobrecarregada superaquecer e dilatar, aumentando a possibilidade de curtos-circuitos no contato com outra ligação das fases.

4.1 - Ocorrências de Falha do Sistema

No sistema tomado como exemplo, foram registradas ocorrências voluntárias e involuntárias em componentes do sistema causando interrupção de fornecimento de energia, qualquer que seja a origem deles [6].

Não serão levadas em consideração as ocorrências em instalações próprias dos consumidores, nas quais se inclui sua rede a não ser que uma falha interna a um consumidor provocar interrupção no sistema.

4.2 - Informações Necessárias para Registro da Ocorrência de Falha do Sistema

Para formar o banco de ocorrências de falhas do sistema são necessários dois blocos distintos de informações:

- 1 - Dados do Sistema
- 2 - Dados das Ocorrências

O primeiro conjunto é um levantamento dos componentes do sistema, em resumo, considera-se a configuração do sistema.

O segundo conjunto são os dados que descrevem a ocorrência e deverão ser coletados e arquivadas diariamente.

Todas as concessionárias de Energia Elétrica possuem um manual de instruções para seus registros em formulários próprios, contendo as diretrizes para atendimento das prerrogativas do seu sistema.

4.3 - Dados do Sistema

- SUBESTAÇÃO

Número e Nome

Localização (Município e Gerência Regional)

Sigla

Zona Elétrica

Total de Alimentadores Disponíveis

Total de Pontos Notáveis que a Subestação possui

MVA Disponível

Carga com Data de Leitura Demandas com Valores Mensais.

- ALIMENTADOR

Número e Nome do Alimentador

Tensão Nominal

Barramento a que está ligado

Ponto de Origem (Primeiro Trecho)

Fator de Potência

Fator de Carga

Fator de Demanda

Carga com Data de Leitura Tensão, Consumos, e Número de Consumidores e Demandas com Valores Mensais.

- TRANSFORMADOR DA SUBESTAÇÃO

Número

Barramento

Potência

Tensão Primária e Secundária

- PONTO NOTÁVEL

Número

Número do Ponto Anterior

Alimentador a que o ponto pertence

Coordenadas Geográficas

Distância do Trecho (entre o ponto e o ponto anterior)

Condutor do Trecho

Número do Conjunto a que o ponto pertence.

OBSERVAÇÃO:

O conjunto é caracterizado por uma mesma área contínua que reúne consumidores.

Esta área é definida pela concessionária, ressaltando, entretanto, que:

- Para uma mesma área urbana dividida em mais de um conjunto devem ser observados em cada conjunto os índices estabelecidos para o total de consumidores da área.
- Não podem ser reunidos em um mesmo conjunto de consumidores situados em áreas urbanas não contíguas.
- Áreas com menos de 5000 (Cinco Mil) consumidores supridos por sistemas isolados (PORTARIA 046 DNAEE).

- EQUIPAMENTOS

Número

Identificação

Município

Tipo

Logradouro a que estão fixados.

* CHAVES (CH)

Número, Posição (Aberta ou Fechada), elo fusível.

* CIRCUITOS (CC)

É o local físico da Rede Secundária

- Quadricula

- Número de consumidores que possui

- Potência instalada

- Fases

- Iluminação Pública (Potência)

- Número do transformador ligado

- Histórico

- Limites

- Cargas penderentes.

4.4 - Dados de Ocorrência de Falha do Sistema

- Início da ocorrência (dia, mês, ano, hora, minuto).

- Duração da ocorrência (tempo em minutos)

- Ponto Notável (ponto do alimentador onde ocorreu a interrupção).

- Subestação

- Componente Afetado - identifica o equipamento que falhou.
- KVA interrompido.
- Número de consumidores atingidos.
- Tipo de Desligamento - identifica se o desligamento é involuntário ou voluntário.
- Tipo de Rede Atingida - identifica se a rede é primária, secundária ou transmissão.
- Condições atmosféricas.
- Causa de ocorrência.
- Número do alimentador atingido.
- Defeito Posterior - indica se houve defeito na rede após a interrupção.
- Repercussão da Ocorrência - indica número de consumidores atingidos, KWH perdido.