

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

**"CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO NA
PRESENÇA DE INCERTEZAS NOS DADOS"**

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

MARCELO MENEZES REIS

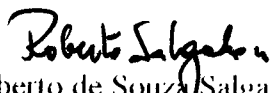
FLÓRIANÓPOLIS, 27 DE OUTUBRO DE 1993

CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO NA
PRESENÇA DE INCERTEZAS NOS DADOS

MARCELO MENEZES REIS

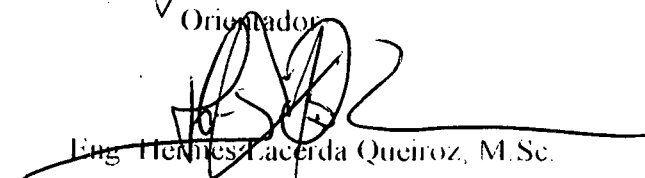
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Jorge Coelho, D.Sc.
Orientador


Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

APRESENTA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS
PROFESSORES:


Prof. Jorge Coelho, D.Sc.
Orientador


Eng. Hermes Lacerda Queiroz, M.Sc.


Prof. Hans Helmut Zinn, Ph.D.


Prof. C. Celso de Brasil Camargo, M.Sc.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jorge Coelho pela oportunidade oferecida, e por todo o apoio durante a realização deste trabalho, e a todos os colegas do LABPLAN-GPSE, que de uma forma ou de outra contribuíram para a conclusão desta dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior- CAPES/MEC pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS	11
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	14
1.1- OBJETIVO	16
1.2- CONTEÚDO	16
CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1- INTRODUÇÃO	18
2.2- AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	18
2.3- ANÁLISE DE INCERTEZAS	30
2.4- CONCLUSÃO	35
CAPÍTULO 3- METODOLOGIA CST	36
3.1 INTRODUÇÃO	36
3.2- DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	37
3.2.1- Características do modelo de falha	37
3.2.2- Hipóteses simplificadoras adotadas	40
3.2.2.1- Frequência de falha versus taxa de falha	40
3.2.2.2- Ordem das contingências	42
3.2.2.3- Probabilidade de falhas ativas simultâneas	43
3.2.2.4- Probabilidade de dois elementos presos simultaneamente	44
3.2.2.5- Influência das condições climáticas	44
3.2.2.6- Manutenção programada dos componentes	47
3.2.2.7- Falhas de modo comum	48
3.2.2.8- Outras considerações	49
3.2.3- Equações dos índices de confiabilidade	50

3.2.3.1- Contingência simples (falha passiva ou ativa).....	50
3.2.3.2- Contingência dupla.....	53
3.2.3.3- Contingência dupla envolvendo manutenção programada	54
3.2.3.4- Falha temporária simples, e falha ativa conjugada com disjuntor preso	54
3.2.4- Diagrama do modelo de operação	55
3.3- APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	56
3.3.1- Representação do sistema.....	56
3.3.2- Método dos cortes mínimos	57
3.3.3- Expressões dos cortes mínimos para os vários modos de falha	59
3.3.3.1- Falhas Passivas.....	60
3.3.3.2- Falhas ativas.....	62
3.3.3.3- Falhas temporárias	63
3.3.3.4- Índices totais para o ponto de carga	65
3.3.3.5- Índices totais para o sistema	66
3.4- CONCLUSÃO.....	66
CAPÍTULO 4- TRATAMENTO DE INCERTEZAS	68
4.1- INTRODUÇÃO.....	68
4.2- MODELOS DE TRATAMENTO DE INCERTEZAS	69
4.2.1- Simulação Monte Carlo.....	69
4.2.2- Métodos Analíticos	72
4.2.2.1- Obtenção das distribuições dos índices	73
4.2.2.2- Obtenção de intervalos de confiança para os índices.....	74
4.3- DETERMINAÇÃO DO MODELO DE TRATAMENTO DAS INCERTEZAS	75
4.3.1- Características das Metodologias.....	75
4.3.1.1- Metodologia de Patton [20]	76

4.3.1.2- Metodologia analítica de González-Urdaneta e Cory [19]	78
Representação das incertezas nos cortes mínimos.....	80
Cálculo do intervalo de confiança através da Desigualdade de Chebyshev	84
Conservatividade do intervalo de confiança obtido via Desigualdade de Chebyshev	85
4.4- CONCLUSÕES	92
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA CSTD1 - CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO INCERTEZAS NOS DADOS	94
5.1- INTRODUÇÃO	94
5.2- INCLUSÃO DAS INCERTEZAS DOS VÁRIOS MODOS DE FALHA	95
5.2.1- Novos coeficientes	95
5.2.1.1- Falha passiva de um componente i estando outro componente j em manutenção programada	98
5.2.1.2- Falha temporária de um componente (sanada por chaveamento de elementos normalmente abertos)	100
5.2.1.3- Falha temporária de um componente i estando outro componente j em falha passiva	101
5.2.1.4- Falha temporária de um componente i estando outro componente já em manutenção programada	101
5.3- METODOLOGIA CSTD1.....	102
5.3.1- Identificação dos cortes.....	102
5.3.2- Considerações sobre independência de cortes	103
5.4- APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	105
5.5- CONTRIBUIÇÕES AO ALGORITMO	108
5.5.1- Alterações no módulo principal	109
5.5.2- Alterações nos módulos de identificação dos modos de falha	109

5.5.3- Novos módulos	109
5.5.3.1- Módulo de cálculo das incertezas- INCERT.....	110
5.5.3.2- Módulo de identificação de falhas por atuação da proteção em sistemas de distribuição radiais- CORTED	110
5.5.3.3- Módulos BUSCA e PARALEL.....	111
5.5.3.4- Aplicação em um sistema radial	113
5.6- CONCLUSÕES	115
CAPÍTULO 6- TESTES E ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CSTDIA A SISTEMAS	117
6.1- INTRODUÇÃO.....	117
6.2- EXPRESSÕES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE	119
6.2.1- Valor esperado da frequência de falha	119
6.2.2- Variância da frequência de falha	122
6.2.3- Valor esperado da probabilidade de falha.....	124
6.2.4- Variância da probabilidade de falha	125
6.2.5- Conclusões gerais sobre as expressões dos índices.....	126
6.3- SISTEMAS ANALISADOS	126
6.3.1- Sistema 1- Subestação de distribuição [8]	127
6.3.1.1- Resultados da aplicação da metodologia CSTDIA ao Sistema 1.....	128
6.3.1.2- Observações	129
6.3.1.3- Particularidades do Sistema 1.....	130
6.3.2- Sistema 2- Subestação de 500kV a disjuntor e meio	133
6.3.2.1 - Resultados da aplicação da metodologia CSTDIA ao Sistema 2.....	134
6.3.2.2 - Observações	137
6.3.3 - Sistema 3- sistema de distribuição ligado à barra 2 do sistema RBTS-IEEE [45]	138
6.3.3.1 - Resultados da aplicação da metodologia CSTDIA ao Sistema 3.....	141
6.3.3.2 - Observações	145
6.3.3.3 - Particularidades do Sistema 3	146

6.3.4 - Sistema 4- sistema de distribuição ligado à barra 4 do sistema	
RBTS-IEEE [45]	147
6.3.4.1 - Resultados da aplicação da metodologia CSTDI ao Sistema 4.....	149
6.3.4.2 - Particularidades do Sistema 4.....	152
6.4 - CONCLUSÃO.....	153
CAPÍTULO 7- CONCLUSÕES FINAIS.....	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	161
APÊNDICE A- METODOLOGIA CODI DE CÁLCULO DA	
CONFIABILIDADE ESPERADA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO [38]	165
APÊNDICE B- COEFICIENTES c_i E b_i PARA A METODOLOGIA GU&C [19]	176
APÊNDICE C- COEFICIENTES c_i E b_i PARA A METODOLOGIA CSTDI	179
APÊNDICE D- COMPONENTES QUE INTERROMPEM O FORNECIMENTO NOS	
MODOS DE FALHA QUE ENVOLVEM A ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO NOS	
SISTEMAS 1 E 3	188

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia de avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão e distribuição, considerando a existência de incertezas nos dados das taxas de falha e tempo médio para reparo (taxa de reparo) dos componentes.

Utilizou-se a metodologia de cortes mínimos para avaliação da confiabilidade, e a determinação de intervalos de confiança para os índices sob estudo através da Desigualdade de Chebyshev, sem a necessidade de determinar a função densidade de probabilidade dos índices.

Com o intuito de dar maior realismo ao estudo diversos modos de falha dos componentes foram considerados: falhas permanentes (passivas), falhas ativas (por atuação da proteção), falhas temporárias (falhas que podem ser sanadas por chaveamento de elementos N A), a influência da manutenção programada, e a possibilidade de disjuntores presos quando chamados a operar.

A metodologia pode ser aplicada tanto a sistemas de transmissão, distribuição, quanto a subestações, inclusive de grande porte.

Em sistemas radiais a metodologia identifica os componentes que isolam as falhas ativas, permitindo a sua utilização em estudos de proteção.

Testes foram feitos com diversos sistemas de distribuição e transmissão, malhados e radiais, reais e existentes na literatura, entre os quais os sistemas de distribuição ligados às barras 2 e 4 do sistema RBTS-IEEE.

ABSTRACT

The objective of this paper is to present an approach for evaluation of transmission and distribution systems reliability, considering the existence of uncertainty on data from failure rates and mean time to repair (repair rate).

The minimal cut-set method was used for reliability evaluation, and confidence intervals was calculated for indices under analysis by using Chebyshev's Inequality, without the knowledge of the indices' probability density function.

Looking for more realism for the application various failure modes was considered: permanent failures (passive), active failures (by protection actuation), temporary failures (solved by swichting normally open components), the scheduled maintenance influence, and the possibilty of stuck breakers.

The methodology can be applied to transmission and distribution systems, and to substations and large systems too.

Several distribution and transmission systems were tested, radial and meshed, real and in literature, like the distribution systems connected to the buses 2 and 4 of the RBTS-IEEE system.

LISTA DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS

MTTF- mean time to failure (tempo médio para a falha), geralmente em horas, também notado como m.

MTTR- mean time to repair (tempo médio para o reparo ou duração média da falha), geralmente em horas, também notado como r).

MTBF- mean time between failures (tempo médio entre falhas), geralmente em horas, é o somatório de MTTF e MTTR.

Reparo- significa manutenção corretiva, isto é, aquela necessária para recolocar em operação um componente que tenha falhado (saída forçada, não programada).

Manutenção programada- significa manutenção preventiva, isto é, a saída programada de um componente de operação para reposição de alguma peça, verificação, limpeza, etc.

λ - taxa de falha (geralmente em falhas por ano) de um componente ou sistema

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

μ - taxa de reparo (geralmente em reparos por ano) de um componente ou sistema.

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

S- tempo necessário (geralmente em horas) para isolamento de um componente falhado.

FEC- frequência de interrupção equivalente por consumidor.

DEC- duração equivalente da interrupção por consumidor.

f, FF- frequência de falha (geralmente em falhas/ano) de um componente ou do sistema.

p, PF- probabilidade de falha de um componente ou do sistema.

U, UF- indisponibilidade total, ou horas anuais de interrupção, de um componente ou sistema (em horas/ano).

λ_i - taxa de falha passiva (ou permanente), de um componente i (em falhas/ano).

R_i - duração esperada da falha passiva (ou permanente), de um componente i (em horas).

μ_i - taxa de reparo referente à falha passiva (ou permanente), de um componente i (em reparos/ano).

$$\mu_i = \frac{8760}{R_i}$$

λ_i - taxa de falha ativa, de um componente i (em falhas/ano).

S_i - duração esperada da falha ativa, de um componente i (em horas).

μ'_i - taxa de reparo referente à falha ativa, de um componente i (em reparos/ano).

$$\mu'_i = \frac{8760}{S_i}$$

λ''_i - taxa de manutenção programada, de um componente i (em ocorrências/ano).

R''_i - duração esperada da manutenção programada, de um componente i (em horas).

μ''_i - taxa de reparo referente a manutenção programada, de um componente i (em reparos/ano).

$$\mu''_i = \frac{8760}{R''_i}$$

F_{bv} - frequência de falha calculada sem a consideração de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo dos componentes em falhas/ano (bv = best value).

P_{bv} - Probabilidade de falha calculada sem a consideração de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo dos componentes.

U_{bv} - frequência de falha calculada sem a consideração de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo dos componentes (em horas/ano).

$E\{Ff\}$ - valor esperado da frequência de falha de um ponto de carga ou sistema (em falhas/ano).

$Var\{Ff\}$ ou $\sigma^2\{Ff\}$ - variância da frequência de falha de um ponto de carga ou sistema (em [falhas/ano]²).

$\sigma\{Ff\}$ - desvio padrão da frequência de falha de um ponto de carga ou sistema (em falhas/ano).

$E\{Uf\}$ - valor esperado da indisponibilidade total de um ponto de carga ou sistema (em horas/ano).

$Var\{Uf\}$ ou $\sigma^2\{Uf\}$ - variância da indisponibilidade total de um ponto de carga ou sistema (em [horas/ano]²).

$\sigma\{Uf\}$ - desvio padrão da indisponibilidade total de um ponto de carga ou sistema (em horas/ano).

$\sigma^2\lambda$, $\sigma^2\lambda'$, $\sigma^2\lambda''$ - variância das taxas de falha passiva, ativa e de manutenção programada respectivamente.

$\sigma^2\mu$, $\sigma^2\mu'$, $\sigma^2\mu''$ - variância das taxas de reparo referente à falha passiva, ativa e manutenção programada respectivamente.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O sistema elétrico é composto basicamente de três partes: geração, transmissão e distribuição. Sua função é gerar, transmitir, e distribuir energia elétrica para o uso da sociedade em geral. Além de fornecer energia, o sistema deve propiciar níveis aceitáveis de qualidade e confiabilidade aos consumidores atendidos. Esse último aspecto tem adquirido maior importância nos últimos anos, devido à maior conscientização dos consumidores no sentido de exigir das empresas concessionárias um fornecimento cada vez melhor.

Devido ao grande montante de recursos financeiros envolvidos, e do impacto por vezes catastrófico de suas falhas para o sistema, tradicionalmente sempre se dedicou mais atenção aos estudos sobre confiabilidade da geração e da transmissão, e mais recentemente à confiabilidade composta geração-transmissão.

Contudo, a importância da distribuição não pode ser esquecida. Afinal, ela é a parte do sistema mais próxima dos consumidores, onde é obtido o retorno dos investimentos (mediante cobrança de tarifas), onde ocorre cerca de metade das perdas do sistema elétrico [23], e cerca de 80% das falhas. Assim, nos últimos anos tem havido um maior interesse pelo estudo dos sistemas de distribuição.

Da mesma forma que na geração e transmissão, é grande a preocupação atual com a qualidade da distribuição. Dentro dessa ótica, substanciais esforços têm sido desenvolvidos na melhoria da confiabilidade (inserida na qualidade) dos sistemas de distribuição. Esse interesse intensificou-se no Brasil em particular após a fixação de valores para os índices de continuidade de serviço (duração e frequência equivalente de interrupção por consumidor, DEC e FEC) por parte do DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) [38], detalhes no Apêndice A. Torna-se necessária portanto, a aplicação de métodos que possam avaliar o desempenho dos sistemas de distribuição [15], [1], [5-8], etc, e a utilização a

teoria da confiabilidade para embasar tais métodos permite estudar sistemas complexos e com grande número de componentes.

Nos últimos anos vários métodos de cálculo de confiabilidade têm surgido, mas de uma forma geral todos dependem de três fatores [24]:

- modelo matemático apropriado para o problema em análise;
- estabelecimento de índice(s) de risco apropriado(s) de qualidade de serviço;
- acesso a banco de dados de falha e operação dos componentes.

Quanto à questão dos modelos matemáticos existe um razoável número de técnicas disponíveis, ou usando uma abordagem analítica (obtendo expressões para os índices) ou através de simulação. Não obstante, em alguns casos encontram-se dificuldades na formalização matemática do estudo. A determinação dos índices de risco apropriados, o que depende do objetivo do estudo e da noção que se tenha de qualidade do serviço. Mas o terceiro aspecto, o banco de dados, é o ponto principal, uma vez que é indispensável para a validade do modelo, e nem sempre seu tratamento tem acompanhado a evolução dos modelos matemáticos [24]. Por esse motivo, a consideração de incertezas nos dados é feita em grande parte dos trabalhos contemporâneos [25], [26], [29] e [39].

Em um país como o Brasil, em que os bancos de dados sobre falha e operação dos componentes são limitados, não apropriados ou mesmo inexistentes, devido muitas vezes a erros no registro ou compilação das ocorrências operacionais [25-26], a consideração de incertezas nos dados passa a ser de grande importância. Trata-se de uma forma de tentar garantir a qualidade dos dados, necessária para a validação de qualquer método de avaliação da confiabilidade.

1.1- OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é descrever uma técnica para a avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão e também distribuição, considerando a existência de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo dos componentes. São abordados diversos modos de falha tais como: falhas passivas (permanentes), falhas ativas, falhas temporárias e a influência da manutenção programada. O método dos cortes mínimos é utilizado para a determinação dos eventos que causam interrupção. Importante ressaltar que a metodologia pode ser aplicada tanto à distribuição quanto à transmissão, e a sistemas de grande porte.

1.2-CONTEÚDO

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão dos principais trabalhos publicados acerca de confiabilidade de distribuição e tratamento de incertezas nos últimos trinta anos, mostrando o atual estágio em que se encontram estas técnicas.

A descrição da metodologia de avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Transmissão (CST), que serve como importante substrato deste trabalho, é feita no Capítulo 3.

Já no Capítulo 4, descreve-se a metodologia de tratamento de incertezas nos dados proposta por González-Urdaneta e Cory, determinando limites de confiança para os índices de confiabilidade.

No Capítulo 5 avalia-se a compatibilidade das duas metodologias, e descreve-se a técnica de avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição considerando Incertezas nos dados (CSTDI).

Os resultados da aplicação da metodologia do Capítulo 5 em diversos sistemas-teste são mostrados no Capítulo 6.

As conclusões finais, principais contribuições e sugestões para futuros trabalhos que permitam maiores avanços na avaliação da confiabilidade de sistemas de distribuição, são apresentados no Capítulo 7.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- INTRODUÇÃO

No presente capítulo será feita uma revisão da literatura sobre confiabilidade de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, e sobre análise de incertezas. Adotou-se como norma iniciar a pesquisa a partir da década de 60, visto que nesse intervalo encontram-se os trabalhos mais relevantes sobre o assunto.

Inicialmente será abordada a avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão/distribuição e posteriormente a análise de incertezas.

2.2-AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Z.G. Todd em trabalho pioneiro de 1964 [1], sugeriu um método de cálculo das frequências de falha médias, para qualquer ponto de um sistema de transmissão e distribuição. Para tanto propôs um modelo de operação a dois estados para os componentes (operando e em estado de falha), a possibilidade de falhas simultâneas, e que através de associações série e paralelo seriam obtidos os índices para o ponto de interesse. O método, porém, não considerava a influência das condições atmosféricas, manutenção programada e tampouco era apropriado para grandes sistemas, ou mais de um ponto de carga.

No mesmo ano do trabalho anterior, Gaver, Montmeat e Patton [2], propuseram um método com maior grau de realismo para cálculo de vários índices de confiabilidade tais como: número médio anual de interrupções por consumidor, tempo médio de restauração do consumidor, tempo médio total anual de interrupção por consumidor, etc. Consideraram a influência do tempo adverso (que eleva consideravelmente as taxas de falha), através de um modelo climático a dois estados (tempo normal e adverso), além do modelo operacional a dois

estados (operando e falhado). Consideraram também a influência da manutenção programada, falhas temporárias e falhas causadas por sobrecargas. Algumas hipóteses foram feitas com o intuito de simplificar a dedução das equações obtidas:

- 1- as taxas de falha e reparo são independentes.
- 2- os tempos para a falha e tempos de reparo são exponencialmente distribuídos.
- 3- as durações do tempo normal e adverso são exponencialmente distribuídas.
- 4- as durações dos tempos médios de reparo (MTTR- mean time to repair) são muito menores do que as dos tempos médios para a falha (MTTF- mean time to failure) e do que a duração do tempo normal; isso implica em admitir-se que a taxa de reparo é muito maior do que a taxa de falha tanto durante o tempo normal quanto no adverso:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTTF}} \qquad \mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \qquad (2.1)$$

se $\text{MTTR} \ll \text{MTTF}$, então, $\mu \gg \lambda$.

- 5- a manutenção programada programada sempre é feita em tempo normal, não sendo realizada quando provoca sobrecarga em outro componente ou não pode ser completada antes do tempo adverso.
- 6- a duração do tempo adverso é muito menor do que a duração dos tempos médios para a falha e tempos médios de reparo.
- 7- a duração dos tempos de manutenção programada é exponencialmente distribuída.
- 8- se a falha de um componente causa sobrecarga em outros, estes componentes ficarão fora de operação até que aquele seja reparado.

Muitas dessas aproximações são usadas em vários dos trabalhos posteriores, até os dias de hoje. Os índices de confiabilidade eram calculados através de associações série e paralelo entre os componentes.

Em 1970 Ringlee e Goode [3] apresentaram um método para avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão, passo a passo, obtendo resultados algébricos simples para

frequência e duração de contingências, através do uso da teoria dos processos de renovação independente.

Um processo renovável é um processo estocástico de contagem, para o qual os tempos entre eventos sucessivos são independentes e identicamente distribuídos com uma distribuição arbitrária [24]. As distribuições de probabilidades dos tempos para falha e reparo podem ser quaisquer, sendo apenas requerido que sejam as mesmas para cada ciclo opera-falha-reparo.

O método apresenta cinco passos:

- 1- descrição do sistema: topologia, taxas de falha, durações de falha, etc.
- 2- critérios para performance: quais os critérios que definem o sucesso do sistema.
- 3- nível de confiabilidade requerido: número e tipo de eventos-falha que o sistema pode suportar sem comprometer seu desempenho, tempo médio entre falhas desejado, etc.
- 4- análise dos modos e efeitos de falha: análise de contingências, verificando seu efeito na proteção, carregamento dos circuitos, interrupção do fornecimento à carga, etc; verificação para cada contingência se os critérios estabelecidos no passo 2 são satisfeitos, se não forem, determinação das medidas corretivas, e armazenagem destes dados bem como os pontos afetados.
- 5- enumerar as contingências mais prováveis (obtidas no passo 4) e combiná-las de modo a calcular a indisponibilidade total do sistema

Endrenyi [4] apresentou em 1971 um modelo a três estados para representar as falhas dos componentes baseado em características de operação do sistema. Quando um determinado equipamento falha, pode ocorrer que ele seja isolado pela atuação da proteção, através da abertura dos disjuntores mais próximos, a montante e a jusante do componente falhado, juntamente com outros elementos não falhados. Em seguida são postos em serviço novamente, todos os componentes que não sejam estritamente necessários para manter isolado o elemento falhado. Assim, do ponto de vista do sistema considerado, a falha de um componente qualquer pode ser seguida de um estado no qual uma série de elementos estão fora de operação, e

posteriormente de um outro estado em que somente o componente falhado se encontra isolado do sistema. Tem-se então um modelo a três estados:

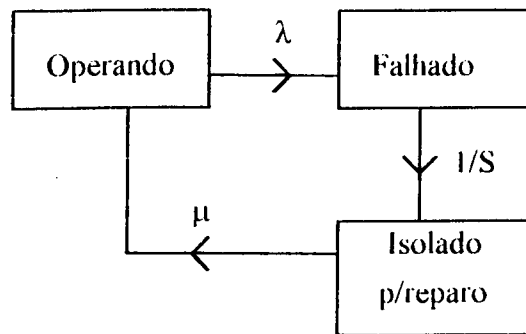


Figura 2.1- Modelo de operação a três estados

Onde:

- λ é a taxa de falha do componente (ver equação 2.1).
- μ é a taxa de reparo do componente (ver equação 2.1).
- S é o tempo necessário para isolamento do componente falhado.

Algumas características do modelo são apresentadas:

- 1- os componentes tanto têm características de dois (operando/falhado) ou três estados.
- 2- o tempo de chaveamento (isolamento do componente falhado) é muito menor do que o tempo de reparo, que por sua vez é muito menor do que o tempo de operação.
- 3- a manutenção programada é independente da falha do componente mas: se um componente estiver falhado e a manutenção programada de outro causar falha no sistema, a manutenção programada não será iniciada; se a manutenção programada foi iniciada será terminada mesmo que uma falha em outro componente coloque o sistema em um estado de falha.
- 4- o sistema está em estado estacionário (a probabilidade do sistema residir em cada estado não varia mais no tempo).
- 5- apenas contingências de primeira e segunda ordem são analisadas (as de maior ordem têm probabilidade desprezível).

6- em todas as contingências simples a operação do sistema pode ser restaurada por chaveamento.

7- não se consideram contingências duplas de componentes em estado entre a falta e o chaveamento (estado falhado na figura 2.1), devido à sua reduzida duração (S costuma ser bem menor do que o tempo para a falha e o tempo de reparo, reduzindo muito a possibilidade de durante o tempo necessário para isolar um componente, outro elemento do sistema venha a estar na mesma situação).

Após a análise de um exemplo o autor chegou a outras duas conclusões:

- falhas de um componente quando outros estão em manutenção programada contribuem mais para a indisponibilidade do sistema do que falhas simultâneas de dois componentes, sugerindo que um maior intervalo entre os períodos de manutenção programada poderia melhorar a confiabilidade do sistema.
- os maiores causadores de falhas do sistema são os disjuntores e os transformadores de alta tensão, por protegerem e suprirem, respectivamente, um também razoável número de elementos do sistema.

Em 1975, Billinton e Grover apresentaram três importantes trabalhos ([5], [6], [7]).

No primeiro deles [5], formularam uma série de equações para cálculo da frequência e duração da falha em um ponto de carga, em um modelo climático a dois estados (tempo normal e tempo adverso). Usaram as mesmas hipóteses do trabalho de Gaver, Montmeat e Patton [2], com exceção de uma: a duração do tempo adverso não precisa ser muito menor do que a do tempo de reparo. Deste modo pode haver mudança nas condições climáticas durante a realização do reparo. Essa pequena alteração fará toda a diferença entre os resultados obtidos pelo método anterior [2] e o sugerido aqui por Billinton e Grover. Os autores compararam os resultados dos dois métodos com os conseguidos pela técnica de Markov sem simplificações, e chegam à conclusão de que o método aproximado modificado, desenvolvido por eles, é que realmente se aproxima dos resultados mais precisos de Markov, refutando as conclusões da referência [2]. As equações consideram a possibilidade ou não de reparo em

tempo adverso e contingências de até terceira ordem. Os autores não definem modos de falha, mas sugerem a utilização do método em conjunto com a técnica de análise de modos e efeitos de falha (cortes mínimos). Maiores detalhes sobre a técnica dos cortes mínimos no Apêndice D.

- Nos demais trabalhos ([6] e [7]), Billinton e Grover estenderam o método para vários modos de falha, a saber:
 - falha permanente: aquela que exige que o elemento fique fora de operação até ser reparado ou substituído (também denominada falha passiva).
 - falha temporária: aquela sanada por religamento ou chaveamento, manual ou automático, em poucos minutos.
 - falta por manutenção programada: pois durante a manutenção programada o componente está fora de operação.
 - falha por sobrecarga: devido a uma outra falha ou devido às condições do sistema, o componente fica sobrecarregado, o que pode implicar em sua retirada de operação ou corte parcial de carga, podendo configurar uma falha.

Devido às definições acima, algumas modificações são feitas nas hipóteses do trabalho anterior [5]:

- as distribuições que descrevem as durações dos períodos de tempo normal e adverso, e tempos de operação e falha dos componentes têm uma média de valor finito conhecido.
- a manutenção programada preventiva é iniciada no tempo normal e não é realizada quando já existe uma falha no sistema, ou quando provocará sobrecarga em outro componente.
- a probabilidade de duas falhas temporárias simultâneas é desprezível, e a probabilidade de um componente sobrecarregar-se durante uma falha temporária também é desprezada.

Com base nessas e nas outras hipóteses, diversas equações são formuladas, mas as diferenças básicas entre os dois trabalhos ([6] e [7]) são:

- em [6] a técnica dos cortes mínimos é aplicada explicitamente, e o modelo climático tem dois estados (normal e adverso).
- em [7] há mais interesse em associações série e paralelo, embora os cortes mínimos também sejam citados, e o modelo climático apresenta três estados (normal, adverso e desastrosamente adverso) a título de maior realismo no tratamento das falhas (que crescem muito no último estado climático); há uma preocupação em comparar-se os resultados obtidos com os provenientes da técnica de Markov.

Como complementação aos trabalhos anteriores, Billinton e Grover apresentaram um programa computacional para análise de confiabilidade da transmissão, principalmente de subestações [8]. Seu método apresenta importantes características:

- uso do conceito de falha passiva (falha que não retira elementos sãos de operação) e de falha ativa (retira alguns elementos sãos de operação, devido à atuação da proteção).
- tratamento de chaves e disjuntores normalmente abertos (que podem vir a restaurar o serviço se fechados após uma falha).
- possibilidade de lidar com equipamentos de proteção reais, isto é, não 100% confiáveis (graças à introdução da probabilidade de disjuntor preso).
- contribuição de eventos simultâneos: duas falhas passivas, falha ativa e passiva, falha ativa e disjuntor preso, falha passiva ou ativa quando um componente está em manutenção programada.
- possibilidade de levar em conta influências climáticas.
- quando houver apenas um ponto de carga, o programa determina quais os componentes que falhando causam sobrecargas em outros (forçando a cortes parciais no fornecimento para sanar a sobrecarga), e calcula sua contribuição aos índices totais de confiabilidade (devem ser fornecidos como entrada, os componentes passíveis de sobrecarga e suas capacidades); havendo mais de um ponto de carga serão necessários estudos de fluxo de potência para a determinação dos componentes sobrecarregados.

As equações para cálculo das contribuições de cada modo de falha são oriundas de outros trabalhos dos autores ([5], [6], e [7]), e ficam permanentemente armazenadas em subrotinas específicas. Este trabalho serviu de base para o CST, que será visto posteriormente.

Em 1979, Koval e Billinton [9] apresentaram um método de cálculo da confiabilidade do sistema, em que se considerava a influência do tipo de equipamento de proteção.

As características de reconhecimento e isolamento da falha por parte da proteção vão influir substancialmente nos resultados obtidos nos cálculos dos índices de confiabilidade.

Contudo, alguns inconvenientes existem:

- aplicar o método a outras configurações que não a radial vai levar a complicação considerável dos cálculos.
- não há consideração de saídas para manutenção programada.
- as contingências a analisar seriam apenas de primeira ordem.

A inclusão de critérios de perda de qualidade e tratamento mais apurado das falhas causadas por sobrecarga foram apresentados por Allan, Dialynas e Homer [10] em 1979.

Perda de qualidade relaciona-se principalmente com limites de tensão, capacidade de transporte de energia dos componentes do sistema, e perda de continuidade no fornecimento.

Tem-se perda de qualidade no suprimento de energia elétrica aos pontos de carga, por exemplo, quando:

- os limites de tensão são ultrapassados.
- há componentes operando em sobrecarga, podendo acarretar no corte parcial do fornecimento (perda de continuidade) para resolver o problema.
- um componente qualquer falha, interrompendo o fornecimento a um ou vários pontos de carga.

Note-se que a perda de continuidade do suprimento está incluída na perda de qualidade, logo a confiabilidade está incluída na qualidade do suprimento.

Os autores demonstraram que a desconsideração de cortes de carga devidos à sobrecarga em algum componente, causada por falha em outro qualquer, levará a valores irreais de taxa e duração de falha, bem como de energia não suprida. Em outras palavras uma análise da confiabilidade de um sistema deve incluir os dois critérios: perda total de continuidade (existência ou não de caminho de suprimento entre fonte e carga) e perda parcial de continuidade (corte de carga para manter as condições do sistema dentro de um limite, de sobrecarga dos elementos, de nível de tensão, etc).

Há também a consideração da possibilidade de transferência de cargas. Um modelo foi desenvolvido para levar em conta essas facilidades no cálculo dos índices de confiabilidade.

No ano de 1980, a ELETROSUL desenvolveu a metodologia CST-Confiabilidade de Sistemas de Transmissão [11]. O sistema tem por objetivo a avaliação numérica da confiabilidade de um sistema de transmissão, através do cálculo de índices que permitam uma comparação entre diversas alternativas para o mesmo, logo uma metodologia eminentemente voltada para estudos de planejamento. O critério utilizado é o de continuidade do fornecimento de energia a um ponto de carga especificado, calculando a frequência das interrupções, a duração média esperada das mesmas e o tempo total esperado de interrupção de fornecimento de energia ao ponto de carga em análise.

O algoritmo implementado para a determinação desses índices é baseado em um modelo de confiabilidade a três estados [4] e utiliza a teoria dos processos de renovação independentes [3], através do método de análise dos modos e efeitos de falha (cortes mínimos). Estabeleceram-se os seguintes modos de falha:

- permanente (ou passiva) tal como definida por Billinton e Grover [6], [7].

- ativa, quando a falha do componente leva a atuação da proteção desconectando-o da rede juntamente com outros elementos não falhados, sendo que aqueles não essenciais para o isolamento do componente falhado serão religados.
- temporária, tal como definida por Billinton e Grover [6], [7].
- por disjuntor preso, quando o disjuntor que atuaria para isolar um componente que sofresse uma falha ativa, por alguma razão não opera, levando a uma interrupção no fornecimento ao ponto de carga em análise.
- por manutenção programada, quando há conjunção com uma falha permanente, ativa ou temporária somente.

Posteriormente há uma totalização das contribuições de cada modo de falha para o ponto de carga, e de todos os pontos de carga para o sistema, considerando que a interrupção do fornecimento de energia a qualquer ponto de carga ocasiona falha no sistema.

A metodologia considera contingências de primeira e segunda ordens, o que é suficiente para fins práticos. São necessários dados sobre a topologia do sistema e as características de cada componente (são admitidos até quinze tipos diferentes de componentes) Há previsão para até trezentos nós e quinhentos ramos, vinte pontos fonte e vinte pontos de carga. A metodologia CST foi implementada em computador e vem sendo utilizada pela ELETROSUL, CEPEL e outras concessionárias de energia elétrica. Maiores detalhes são apresentados no Capítulo 3.

Em 1981 Singh [12] publicou um método composto que aplica a técnica de Markov e também os cortes mínimos para avaliação da confiabilidade de grandes sistemas, quando os componentes não podem ser considerados estatisticamente independentes. O método consiste em elaborar as equações de cortes mínimos de probabilidade e frequência de falha do sistema e então calcular seus termos usando técnicas de Markov, gerando a matriz de transição de cada corte mínimo, independente do resto do sistema. O grau dos cortes mínimos é limitado à terceira ordem, o que é mais que suficiente para fins práticos.

Billinton e Kumar [13] em trabalho de 1981 ainda, desenvolveram modelos e equações para avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão e distribuição, levando em conta, simultaneamente, efeitos das condições atmosféricas e dos modos de falha comum. Sem essas considerações os índices de confiabilidade serão mais otimistas do que os reais, podendo conduzir à conclusões errôneas.

Os autores esclareceram a diferença entre o modo de falha comum (uma causa gerando várias falhas independentes entre si) que podem ocorrer em tempo normal e adverso, e as falhas independentes que ocorrem em maior número durante o tempo adverso. As falhas de modo comum têm uma influência predominante nos índices do sistema, de forma que o erro cometido ao desconsiderar-se as influências do tempo não serão grandes.

Equações para a taxa média de falha e duração média de falha são apresentadas, supondo ou não reparo em tempo adverso, e levando em conta modo de falha comum e efeitos do tempo. Os resultados obtidos com estas equações foram comparadas com a Técnica de Markov, ficando muito próximos.

Em 1986 Oliveira [15] apresentou um trabalho em que comparava diversas metodologias de cálculo de confiabilidade aplicada à sistemas de distribuição.

A autora analisou a metodologia do CODI (Comitê de Distribuição da ELETROBRÁS), detalhes no Apêndice A, para cálculo do FEC- frequência de interrupção equivalente por consumidor e DEC- duração equivalente da interrupção por consumidor, a metodologia de Koval e Billinton [9], e a metodologia do programa CST [11] da ELETROSUL (desenvolvido para sistemas de transmissão e subestações)

Chegou-se à conclusão de que as duas primeiras metodologias apresentam dois limitadores:

- consideram apenas contingências de primeira ordem.
- são preferencialmente voltadas para sistemas radiais, não se aplicando a estudos de planejamento de sistemas de distribuição, quando podem ser consideradas configurações do tipo malhado ou reticulado como alternativas de expansão da rede.

Na metodologia de Koval e Billinton [9] a autora também ressalta que o porte do sistema radial somente deixa de ser crítico quando não são consideradas falhas na proteção, inviabilizando, quando isso não ocorrer, o cálculo manual.

A outra metodologia estudada, a do CST, foi considerada a mais adequada para uso em estudos de planejamento:

- apresentou resultados satisfatórios no estudo da confiabilidade de sistemas de distribuição, principalmente no que tange à análise de alternativas de reforços para melhoria da confiabilidade do sistema, não obstante ter sido criado para sistemas de transmissão.
- encontra-se já implementada em computador digital, permitindo maior rapidez nos cálculos e manipulação dos dados.

Partindo para a linha de otimização, em 1990, Sallam, Desouky e Desouky [16] aplicaram o método de projeção do gradiente para obter valores ótimos dos índices de confiabilidade. O objetivo é a minimização do custo de interrupção aos pontos de carga considerados. Propõem que a melhoria matematicamente obtida pode ser implementada na prática mediante aperfeiçoamentos no sistema.

Fong e Grigg em 1991 [17] propuseram um modelo para falha e reparo dos equipamentos de transmissão e sua influência na confiabilidade dos sistemas de sub-transmissão. Os métodos levam em consideração variação arbitrária da carga e tempos de reparo seguindo distribuições não exponenciais, e estudam os efeitos de falhas independentes simples e simultâneas e modo de falha comum.

Discrepâncias significativas poderão resultar da suposição de que os tempos de reparo são exponencialmente distribuídos, se por acaso não forem, na situação de modo de falha comum, e nas falhas independentes simultâneas onde o corte de carga depende da sequência de ocorrência das falhas. Se essa última condição não existir não haverá problema em se supor distribuição exponencial para as falhas independentes simultâneas. Os resultados para falhas simples também não são afetados pela forma da distribuição dos tempos de reparo.

2.3- ANÁLISE DE INCERTEZAS

Em 1966 M. Thompson [18] apresentou um trabalho com técnicas para cálculo do limite inferior de confiança da disponibilidade para um sistema, e teste de hipóteses, supondo os tempos para a falha e de reparo independentes e exponencialmente distribuídos. Apesar de preferencialmente direcionado para componentes eletrônicos pode ser adaptado para outros sistemas e/ou componentes.

As incertezas no tempo para a falha e tempo de reparo são mencionadas (devido ao fato de sua obtenção de uma pequena amostra), implicando em incertezas na disponibilidade do sistema. O inconveniente do método é a utilização de tabelas baseadas em uma distribuição F para identificação dos limite inferior de confiança da confiabilidade do sistema. Com uma distribuição diferente talvez o método não fosse aplicável.

Em 1978 González-Urdaneta e Cory [19] deram mais um passo no tratamento das incertezas nos dados, no cálculo dos índices de confiabilidade. Apresentaram um método para calcular os limites de confiança aproximados para a probabilidade e frequência de falha de um sistema, que pode ser perfeitamente aplicado a sistemas de transmissão e distribuição. A grande vantagem do método é a consideração de incertezas nos dados de cada parâmetro de cada componente (λ e μ), e a técnica usada para determinação dos limites de confiança.

Diversas hipóteses foram feitas, mas todas são basicamente as mesmas feitas em quase todos os métodos de avaliação da confiabilidade de sistemas anteriores:

- taxas de falha e reparo constantes (o que implica em tempos para a falha e reparo exponencialmente distribuídos).
- taxa de reparo do componente muito maior do que sua taxa de falha.
- componentes independentes e modelados a dois estados.
- estimativas conhecidas previamente dos valores médios e variâncias das taxas de falha e reparo.
- o sistema está em estado estacionário.
- uma expressão relacionando confiabilidade dos componentes e do sistema pode ser escrita (cortes mínimos).

Dois tipos de abordagens são apresentadas. A primeira usa o procedimento estatístico de caracterização de distribuições por seus momentos de baixa ordem e uso da Desigualdade de Chebyshev para estabelecer os limites de confiança dos índices em questão, sem se preocupar em identificar a distribuição que eles seguem (outros métodos procuram obter essa identificação). A outra abordagem aplica Simulação Monte Carlo, baseada em modelos de probabilidade comum, nos quais dados de testes dos componentes podem ser traduzidos como limites aproximados de confiança para a confiabilidade do sistema, a qualquer nível de confiança.

Os autores comparam as duas abordagens entre si, evidenciando os tempos de cálculo em computador. Observa-se também que o limite inferior calculado do intervalo de confiança é praticamente o mesmo nas duas abordagens, sendo que o limite superior é ligeiramente maior no caso da simulação. Dois índices foram analisados, a probabilidade e frequência de falha. Os resultados obtidos pela primeira abordagem (analítica), usando a Desigualdade de Chebyshev foram devidamente comprovados, tanto pela comparação com simulação, quanto com a técnica de Markov (maiores detalhes no Capítulo 4)

No ano seguinte, 1979, Patton [20], apresentou um método para determinação das distribuições de probabilidade de dois índices de confiabilidade de um sistema de transmissão e distribuição: número anual de falhas e duração de cada falha. O método também é compatível com a técnica de cortes mínimos.

Algumas considerações sobre o método, porém, devem ser ressaltadas:

- a metodologia tem como pressuposto que os índices seguem uma distribuição (determinada por testes estatísticos de aderência), Poisson para o número de falhas, e Gama para duração das falhas, o que não ocorre na primeira abordagem da referência [19].
- existe uma relação (implícita) entre a variância de um índice e as variâncias e médias ao quadrado das variáveis que o compõem, portanto há uma consideração de incertezas nos dados, mas na referência [19] as incertezas nos dados efetivamente são dados de entrada. Maiores detalhes no Capítulo 4.

Já em 1985, Billinton e Wojczynski [14] apresentaram um trabalho sobre distribuições de probabilidade dos índices de confiabilidade de sistemas de distribuição.

Os autores consideraram que o valor médio dos índices não era mais suficiente, por si só, para uma avaliação adequada da confiabilidade para os consumidores. Seguindo conceitos emitidos em trabalhos anteriores, os autores consideraram que a taxa de falha no ponto de carga segue uma distribuição de Poisson, e que, se e somente se, os tempos de reparo forem exponencialmente distribuídos (o que não é verdade em certos tipos de sistema), a duração da falha no ponto de carga segue uma distribuição Gama. Contudo, ao contrário dos outros trabalhos optou-se por um programa de simulação, que simula a performance de qualquer sistema de distribuição radial com N -seções, com qualquer combinação de distribuição exponencial, normal, log-normal, e Gama, para simular falha, reparo, seccionamento manual, suprimento alternativo e tempos de atuação dos fusíveis.

A conclusão final, na opinião destes autores, é de que as distribuições das durações das falhas no ponto de carga e interrupções anuais no ponto de carga não podem ser descritas por nenhuma distribuição conhecida e devem ser encontradas por simulações ou outros meios.

Billinton e Goel [21] apresentaram em 1986 uma técnica analítica para avaliar distribuições de probabilidade associadas aos índices de confiabilidade dos sistemas de distribuição. Com a aproximação usada pode-se lidar com todos os tipos de distribuição assumidas pelos tempos de reparo e restauração, e cobrir a maioria dos índices de confiabilidade. A técnica utiliza os quatro primeiros momentos de um índice de confiabilidade para avaliar seus percentis, e é baseada nas seguintes suposições:

- o número de falhas de um componente em um ano segue uma distribuição de Poisson.
- tempo de reparo de um componente é muito inferior ao seu tempo em operação.
- se o sistema está em um estado de falha devido a um componente, nenhum outro poderá falhar.
- as falhas dos componentes são independentes entre si.

A análise requer três passos básicos:

- 1) Os quatro primeiros momentos brutos dos tempos para falha e reparo dos componentes e tempos de restauração do sistema são determinados (exige-se que as distribuições de probabilidade seguidas pelos tempos de reparo dos componentes e restauração do sistema sejam dadas).
- 2) Usando os momentos obtidos no passo 1 e informações sobre a configuração do sistema, obtêm-se o valor médio, o segundo, terceiro e quarto momentos centrais dos índices de confiabilidade (uma série de equações foram deduzidas pelos autores para concretizar este passo).
- 3) Utiliza-se o método de Pearson para avaliar os percentis aproximados dos índices. Este método baseia-se na solução de uma equação diferencial, a qual pode gerar uma família de distribuições de probabilidade (família de Pearson):

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{(x + a) * f(x)}{b_0 + b_1 + b_2 * x^2} \quad (2.2)$$

A forma da solução dependerá de a , b_0 , b_1 , e b_2 que são relacionados com os primeiros quatro momentos da variável x . A solução leva a um grande número de famílias de distribuições, com seus momentos conhecidos. Para facilitar o uso da família de curvas de Pearson, foi publicada uma tabela de percentis padronizados. Essa tabela pode ser usada para avaliar os percentis estimados de uma variável aleatória, se sua média, segundo, terceiro e quarto momentos centrais são conhecidos.

A principal limitação da técnica é a necessidade das distribuições de probabilidade poderem ser aproximadas pela utilização dos quatro primeiros momentos centrais. Isso ocorrerá apenas se elas forem unimodais (só assim será possível ajustar uma curva de Pearson a estas distribuições).

Os méritos da técnica são:

- há consideração de incertezas nos dados dos componentes (uma vez que exige como entrada as distribuições de probabilidade dos tempos para a falha e reparo dos mesmos).
- não é necessário achar uma distribuição de probabilidade que se ajuste aos dados amostrais das variáveis de entrada (geralmente um pequeno número de observações por variável), já que a técnica usa os seus quatro primeiros momentos e não a sua distribuição; assim de acordo com os autores, os valores desses momentos, obtidos diretamente da amostra, podem ser usados na análise; observe-se porém, que se a amostra não for suficientemente grande, os momentos obtidos na análise podem estar errados.

Um trabalho semelhante ao anterior foi apresentado por Wong, Tsai e Fong em 1988 [22]. Também obtém as distribuições de probabilidade dos índices através dos quatro primeiros momentos, mas há algumas diferenças na abordagem:

- assume-se que a duração das falhas obedece a uma distribuição Gama, e a indisponibilidade total no ponto de carga (horas/ano) segue uma Poisson composta.

- o objetivo maior é obter índices adequados para uso como base para tomada de decisões a nível de operação (onde muitas vezes não há tempo para esperar o sistema chegar a um estado estacionário, após a mudança anterior).
- não há o uso de tabelas de percentis e explicita-se a relação entre os coeficientes da equação diferencial da família de Pearson em função dos momentos da variável indisponibilidade total.

2.4- CONCLUSÃO

Neste breve capítulo mostrou-se a evolução das técnicas de avaliação da confiabilidade de sistemas de distribuição, ao longo de quase trinta anos, e os principais trabalhos publicados sobre incerteza nos dados, ponto central desta dissertação.

Embora alguns autores tenham reservas sobre seu uso, estão disponíveis diversas técnicas analíticas para o cálculo de índices de confiabilidade (com ou sem a consideração de incertezas nos dados). Estas técnicas permitem estudar sistemas complexos e/ou de grande porte, e têm apresentado bons resultados.

Torna-se claro após esse capítulo, a necessidade de consideração das incertezas nos dados (das taxas de falha e reparo, ou nos tempos para falha e reparo), de modo a permitir resultados mais confiáveis.

Outra conclusão importante, refere-se a conjunção de metodologias de avaliação da confiabilidade e tratamento de incertezas. Diversas metodologias são compatíveis, possuindo técnicas de identificação de contingências e aproximações quase idênticas, permitindo a união de dois métodos, obtendo resultados mais abrangentes e precisos (neste trabalho isso será apresentado no Capítulo 5).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA CST

3.1 INTRODUÇÃO

Em fins da década de 70, a ELETROSUL (Centrais Elétricas do Sul do Brasil) sentiu a necessidade de uma ferramenta que possibilitasse a avaliação numérica da confiabilidade de sistemas de transmissão. À luz de toda a literatura então existente [1-8], a empresa desenvolveu a metodologia CST [11] (Confiabilidade de Sistemas de Transmissão), para uso em estudos de planejamento. Desde então a técnica vem sendo empregada por diversas concessionárias de energia elétrica no Brasil, e em um trabalho apresentado em meados da década de 80 [15], mostrou-se a sua validade para utilização também em estudos de planejamento de sistemas de distribuição.

A metodologia CST materializa-se em um programa computacional que faz a avaliação numérica da confiabilidade de um sistema de transmissão, calculando índices que permitem compará-lo com outras alternativas, ou com diferentes políticas de operação da mesma configuração [11].

O critério de sucesso para o sistema é a continuidade do fornecimento de energia a um ponto de carga, podendo o sistema lidar com até 20 pontos de carga e 20 pontos fonte.

Os índices de confiabilidade calculados são: frequência das interrupções (em falhas por ano), duração da interrupção (em horas), e indisponibilidade total (ou probabilidade de falha, em horas por ano).

3.2- DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A seguir serão apresentadas as características principais dos modelos de falha dos componentes, as aproximações usadas, a técnica para determinação dos eventos que interrompem o fornecimento, e as equações que calculam as contribuições de cada evento ao valor dos índices.

3.2.1- Características do modelo de falha

O modelo que representa as saídas de operação dos componentes é baseado na teoria dos processos de renovação independentes [3], que exige apenas que as distribuições de probabilidade dos tempos para a falha e reparo sejam as mesmas para cada ciclo opera-falha-repara, permitindo o uso de fórmulas gerais para elas [11].

Observa-se que após a falha de um componente em um sistema de potência, ele pode ser isolado pela atuação da proteção (disjuntores mais próximos a montante e a jusante do componente falhado), juntamente com outros componentes não falhados. Assim que possível são postos em operação novamente todos os equipamentos não necessários para manter isolado aquele que está falhado. Pode-se perceber então que, após a falha existe um estado em que vários componentes estão fora de operação, e logo em seguida outro estado em que apenas o que efetivamente falhou está isolado do sistema. Assim, torna-se necessário a adoção de um modelo de falha a três estados, tal como proposto por Endrenyi [4]. Para a manutenção programada (preventiva) considera-se um modelo a dois estados, independente do ciclo de falhas (operando e fora de serviço para manutenção programada)

Apresenta-se a seguir o modelo de falha e manutenção programada:

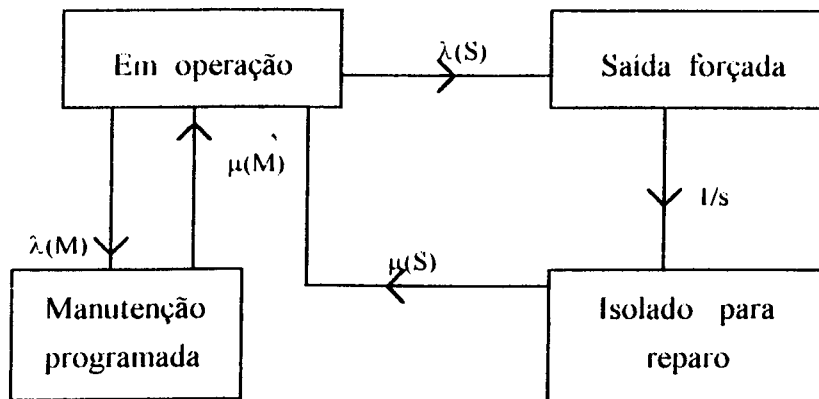


Figura 3.1- Modelo de operação e manutenção programada

Onde:

S - representa o estado de falha

M - representa o estado de manutenção programada

$\lambda(S)$ - taxa de falha(em falhas/ano)

$\lambda(M)$ - taxa de manutenção programada(em ocorrências/ano)

$\mu(S)$ - taxa de reparo(em reparos/ano)

$\mu(M)$ - taxa de reparo referente à manutenção programada(em reparos/ano)

s- tempo de chaveamento(em horas)

Os componentes do sistema podem ser divididos em dois grupos de acordo com a função: estáticos (linhas, barramentos, etc) e dinâmicos (disjuntores, chaves seccionadoras, religadores, etc).

Essa divisão é importante subsídio para a determinação dos vários modos de falha, tais como determinados por Billinton e Grover [5-8]:

- falha ativa [40]: modo de falha de um componente que causa a atuação da proteção primária e pode causar a remoção de outros componentes não falhados; o componente em falha ativa é isolado e os disjuntores fechados, permitindo a restauração do serviço em alguns ou todos os

pontos de carga; o componente falhado, porém, só retornará à operação após o seu reparo ou substituição.

- falha passiva [40] ou permanente: modo de falha de um componente que causa atuação de disjuntores somente para isolá-lo, ou seja, nenhum componente perfeito é removido de serviço; o serviço é restaurado com o reparo ou substituição do componente falhado.

Apresenta-se abaixo um diagrama que proporciona melhor visualização do que foi dito acima:

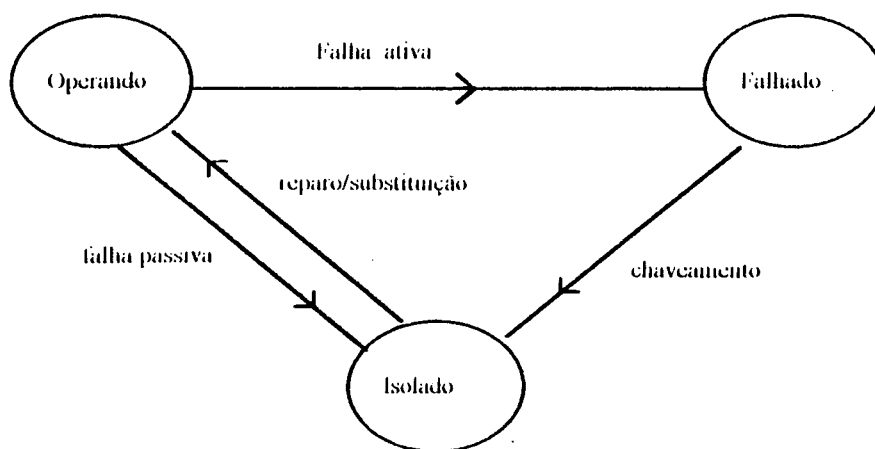


Figura 3.2 - Falha passiva/ativa de um componente

Um exemplo prático pode ser encontrado em [34]: um disjuntor ligado a um barramento sofre uma falha permanente (passiva), porém provoca uma falha ativa no barramento, por atuação da proteção, deixando-o indisponível pelo tempo necessário para isolar o disjuntor falhado e recolocar o barramento em operação.

É importante também ressaltar os outros modos de falha considerados na metodologia:

- falhas temporárias: falhas passivas onde o serviço pode ser restabelecido pelo chaveamento de elementos normalmente abertos (tendo portanto a duração do tempo necessário para este chaveamento).
- falha ativa com disjuntor preso: ocorre a conjugação de uma falha ativa com um disjuntor preso quando chamado a operar, forçando a atuação de outros componentes da proteção, interrompendo o fornecimento.

- falhas por manutenção programada: um componente está em manutenção programada e outro sofre uma falha passiva, ativa ou temporária (tais como definidas acima), interrompendo o fornecimento.

Assim, os estados possíveis das duas categorias de componentes são:

Estáticos: [operando	Dinâmicos: [operando
[falhado ativamente	[falhado ativamente
[falhado passivamente	[falhado passivamente
[fora de serviço para manutenção programada	[fora de serviço para manutenção programada
	[preso

A metodologia de avaliação da confiabilidade é a análise dos modos e efeitos de falha, através de corte topológico (cut-sets). São determinados todos os conjuntos de elementos que, falhados, interrompem todos os caminho entre fonte e carga [28].

3.2.2- Hipóteses simplificadoras adotadas

Tal como colocado até agora o modelo apresentará uma complexidade considerável, e muitas vezes desnecessária para a efetiva representação do sistema real. Assim adotam-se como hipóteses simplificadoras para o estudo, algumas aproximações.

3.2.2.1- Freqüência de falha versus taxa de falha

A operação de qualquer componente processa-se em uma série de ciclos, como o da figura 3.3.

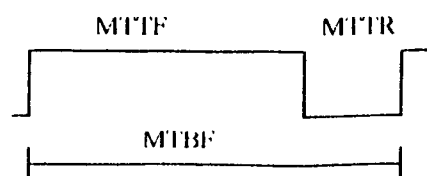


Figura 3.3- Ciclo de operação de um componente

Onde:

MTTF - mean time to failure, tempo médio para a falha.

MTTR - mean time to repair, tempo médio de reparo.

MTBF - mean time between failures, tempo médio entre falhas, $MTBF = MTTF + MTTR$

Sabe-se que a taxa de falha constante (λ) de um componente é:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (\text{falhas/ano}) \quad (3.1)$$

A frequência de falha (f) de um componente é:

$$f = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{MTTF + MTTR} \quad (\text{falhas/ano}) \quad (3.2)$$

Assumindo que o tempo de operação (ou tempo médio para a falha, MTTF) é muito maior do que o tempo médio de reparo (MTTR), é possível concluir-se que:

$$f \cong \frac{1}{MTTF} \cong \lambda \quad (\text{falhas/ano}) \quad (3.3)$$

Desta forma, admite-se que a frequência de falha é aproximadamente igual à taxa de falha, podendo esta aproximação ser feita tanto para componentes individuais, pontos de carga, como para o sistema.

Sabendo-se que:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (\text{falhas/ano}) \quad \text{e} \quad \mu = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{reparos/ano}) \quad (3.4)$$

Se $MTTR \ll MTTF$, implica em $\mu \gg \lambda$.

Com base nessa hipótese o algoritmo CST calcula a frequência (taxa) de falha dos vários pontos de carga, e do sistema como um todo.

3.2.2.2- Ordem das contingências

As contingências de terceira ou maior ordem são desprezadas. Essa simplificação pode ser feita porque são as falhas de primeira e segunda ordem que têm maior influência nos valores dos índices.

A contribuição de cada evento à frequência de interrupção, por exemplo, pode ser calculada pela multiplicação das taxas de falha de cada um dos componentes, ou em outras palavras a contingência é representada por uma associação em paralelo de todos os componentes envolvidos, como mostra a figura 3.4.

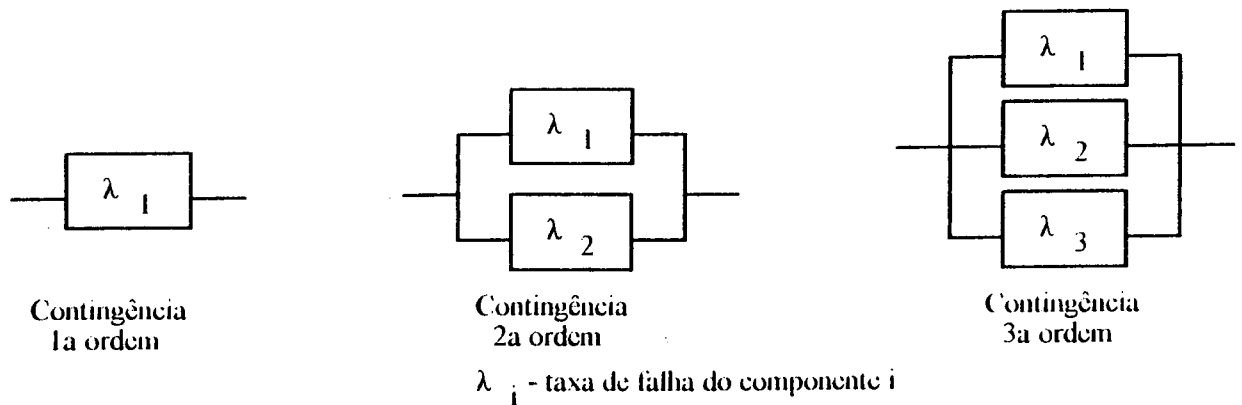


Figura 3.4- Ordem das contingências

O valor da contribuição de cada contingência à frequência de interrupção será (desconsiderando a influência das durações e supondo redundância total):

- 1a ordem: $f = \lambda_1$ - 2a ordem: $f = \lambda_1 * \lambda_2$ - 3a ordem: $f = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3$

Se, por exemplo, todas as taxas λ forem iguais a 1×10^{-2} falhas por ano, as contribuições das contingências de primeira, segunda e terceira ordens serão respectivamente: 1×10^{-2} , 1×10^{-4} e 1×10^{-6} falhas por ano. Mesmo com valores diferentes, as taxas de falha de vários equipamentos geralmente possuem a mesma ordem de grandeza. Portanto, os valores das contribuições das contingências de terceira ordem serão cem vezes menores do que as de

segunda ordem, e dez mil vezes menores do que as de primeira ordem, para o caso em que as taxas de falha forem da ordem de 10^{-2} . Além da razão matemática, o fato do modelo levar em conta a manutenção preventiva dos equipamentos reduz em muito a probabilidade de ocorrência de contingências de maior ordem.

Assim, conclui-se que a desconsideração das contingências de terceira ordem e de maior ordem não invalidará o modelo adotado.

3.2.2.3- Probabilidade de falhas ativas simultâneas

Desprezam-se as contingências constituídas de duas falhas ativas, ou seja a probabilidade de ocorrência de duas falhas ativas simultâneas é desprezível [11].

Essa aproximação justifica-se pela duração da falha ativa, que é o tempo necessário para isolar-se o componente falhado do restante da rede e religar todos os componentes não indispensáveis para isolá-lo. O intervalo de tempo para esta operação é relativamente pequeno, o que acarreta uma redução drástica na probabilidade de, naquele período, ocorrer uma segunda falha ativa no sistema. Mesmo os componentes estáticos que possuem os mesmos valores de taxas de falha passiva e ativa, apresentam menores durações para falhas ativas: uma das características do modelo de operação a três estados, é o tempo para isolamento do componente falhado, ou seja a duração da falha ativa, ser muito menor do que o tempo de reparo (a duração da falha passiva).

Do que foi exposto acima, decide-se pela consideração de falhas ativas apenas de primeira ordem.

3.2.2.4- Probabilidade de dois elementos presos simultaneamente

A probabilidade de o sistema ter dois elementos dinâmicos presos (permanecem fechados quando deveriam abrir, ou permanecem abertos quando deveriam fechar) simultaneamente é tida como desprezível, existindo duas razões principais para tal.

A primeira razão diz respeito ao valor numérico da probabilidade de um disjuntor não operar quando chamado. Esse valor, é um dado necessário para a aplicação da metodologia, sendo da ordem de 10^{-3} [11], ou menos, para equipamentos de transmissão. Assim, a probabilidade de dois disjuntores não operarem simultaneamente seria de 10^{-6} , cerca de mil vezes menor do que a probabilidade de apenas um disjuntor preso.

Uma outra razão, possivelmente uma justificativa para a anterior é a maior atenção dada à manutenção programada dos equipamentos de proteção. Pela sua importância para o sistema, sendo responsável pela segurança e integridade de pessoas e bens materiais, a proteção sempre recebe uma atenção especial, no que tange à manutenção programada, coordenação com a proteção de retaguarda, e mesmo aquisição de equipamentos mais confiáveis.

Pelas duas razões acima, pode-se considerar a probabilidade de dois disjuntores presos simultaneamente como desprezível, mesmo em sistemas de distribuição.

3.2.2.5- Influência das condições climáticas

Uma outra aproximação, não citada em [11], é a desconsideração da influência das condições climáticas nos índices de confiabilidade.

Vários trabalhos ([2], [5-7], [13]) foram publicados propondo a consideração das influências climáticas. Argumenta-se que uma representação mais fiel do sistema somente

poderá ser feita ao considerar duas taxas de falha: uma para tempo normal, e outra para tempo adverso, devido à acentuada diferença entre a confiabilidade do sistema nos dois períodos. No tempo adverso (chuva, tempestades, ventos fortes, etc), logicamente, a propensão a falhas no sistema aumenta consideravelmente. Propõe-se então um modelo de operação:

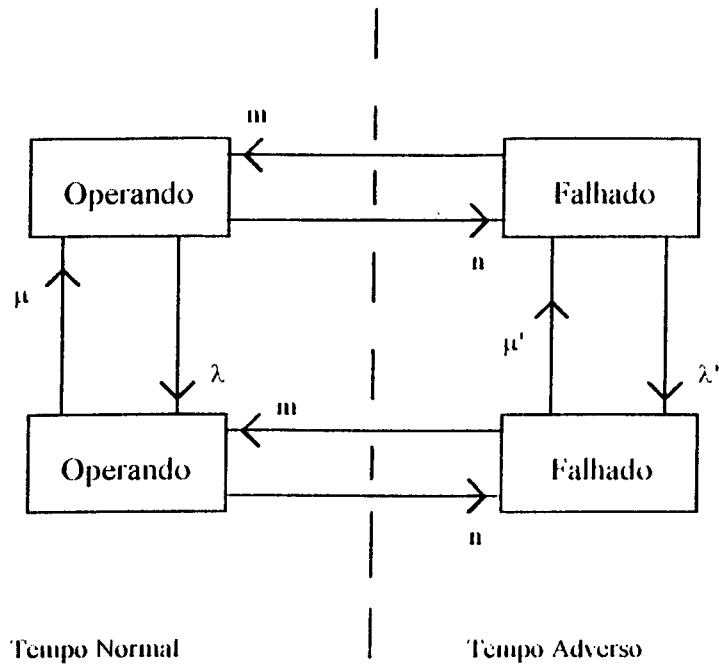


Figura 3.5- Diagrama de espaço de estado

Sejam.

- λ, μ as taxas de falha e reparo dos componentes em tempo normal.
- λ', μ' as taxas de falha e reparo dos componentes em tempo adverso
- S : duração do tempo adverso.
- N : duração do tempo normal.
- $n = 1/N$.
- $m = 1/S$.

Apesar do realismo contido no modelo da figura 3.5, existem algumas razões para a desconsideração das influências climáticas.

Em termos de Brasil torna-se difícil ter acesso a estatísticas sobre duração de tempo normal e adverso, muitas vezes até sobre definição do que é tempo normal e adverso. Normalmente, quando muito, registram-se as ocorrências sem a preocupação de assinalar quais as condições climáticas predominantes no momento da falha (embora, isso possa ser obtido mediante mapas isocerânicos, que registram a ocorrência de trovoadas).

Outra observação importante a ser feita é quanto à relação entre influências climáticas e incertezas nos dados (taxas de falha e reparo dos componentes). A consideração de incertezas nos dados poderá suprir, no todo ou em parte, o fato de o modelo não levar em conta as influências climáticas, particularmente se a incerteza for representada por desvios-padrão das taxas de falha e reparo. Nesse caso, aplicar-se-ia um multiplicador ao valor do desvio-padrão (que traduz a influência de incertezas como erros no registro e compilação das ocorrências, por exemplo [25-26]) para também incluir a influência das condições climáticas.

Se a consideração das influências climáticas na confiabilidade do sistema for indispensável, e dados aproximados sobre as taxas de falha e reparo em tempo normal e adverso, bem como das durações desses períodos forem disponíveis, pode-se usar uma taxa equivalente [40]:

$$\lambda_{eq} = \lambda^* \frac{N}{N+S} + \lambda'^* \frac{S}{N+S} \quad (3.5)$$

Onde λ_{eq} é a taxa de falha equivalente, e os demais símbolos têm significado igual ao da figura 3.5. Não obstante evitar-se a consideração das influências climáticas na modelagem matemática do problema, elas estão presentes nos dados.

3.2.2.6- Manutenção programada dos componentes

Algumas ponderações sobre a influência da manutenção programada na confiabilidade do sistema serão efetuadas a seguir.

Primeiramente, admite-se que nenhum componente será retirado para manutenção programada (preventiva) se houver algum componente anteriormente falhado no sistema [11]. Em outras palavras, elimina-se a possibilidade de ocorrência de uma contingência em que um componente falhando e outro entrando em manutenção programada venham a interromper o fornecimento (por ambos configurarem uma falha, ou pelo componente falhado por si só interromper o fornecimento).

Se dois componentes estiverem falhados e outro entrar em manutenção programada despreza-se uma contingência de terceira ordem (pelos motivos da seção 3.2.2.2, ou se os dois componentes interromperem o fornecimento).

Estas considerações são pertinentes pelo fato de que o reparo de componentes falhados (manutenção corretiva) ser prioritário à manutenção programada (preventiva). Isto é, o reparo do componente falhado é mais urgente do que a manutenção periódica de outros componentes.

Uma vez iniciada a manutenção programada de um componente, ela será completada mesmo que um outro venha a falhar durante o período de manutenção programada. Aqui a situação se inverteu em relação aos parágrafos anteriores: a circunstância que leva à manutenção programada preventiva (periodicidade) ocorre antes da falha, e admite-se a contingência de um componente falhar estando outro em manutenção programada.

Em suma, o primeiro fato que ocorrer, necessidade de reparo ou manutenção programada, tem prioridade, sendo que o reparo de um componente falhado é vital para o

sistema chegando a determinar o adiamento da manutenção programada preventiva de outros.

Pelas considerações anteriores, observa-se que a saída de um componente para manutenção programada, não obstante retirar o componente de operação, deve ser de tal forma planejada a não retirar o sistema de operação (ou seja, o critério de sucesso do sistema deve ser atendido durante a manutenção programada de um componente).

Assim, a manutenção programada de um componente não constitui uma contingência de falha de primeira ordem.

3.2.2.7- Falhas de modo comum

As falhas independentes que são causadas por um mesmo evento são chamadas falhas de modo comum [13], e a metodologia CST não as considera no cálculo dos índices de confiabilidade. Tal decisão necessariamente levará a valores mais otimistas do que os reais.

O objetivo da metodologia é a realização de estudos de planejamento, comparando diversas alternativas de configuração ou políticas de operação do sistema. Assim, os resultados serão analisados de forma comparativa, de modo que o fato de os índices serem mais otimistas não prejudicará a validade do estudo.

Outro fator a ser ponderado é o razoável número de modos de falha abordados por esta metodologia, e que, muitas vezes, são desconsiderados em outros estudos que tratam de falhas de modo comum. O efeito daqueles modos de falha nos índices calculados também é considerável, e não deve ser esquecido.

Se for acrescentado tratamento de incertezas à metodologia CST, o efeito das falhas de modo comum também pode ser agregado, mediante um multiplicador no desvio-padrão das taxas de falha e reparo dos componentes.

Há uma publicação recente [41], porém, que leva em conta os efeitos de falhas de modo comum na determinação de cortes e caminhos mínimos de um sistema, porém sem considerar incertezas nas taxas.

3.2.2.8- Outras considerações

- Independência entre os componentes

As taxas dos componentes são tidas como estatisticamente independentes entre si. Há duas implicações desta consideração: as taxas de falha são independentes das taxas de reparo para cada componente (uma mudança na taxa de falha *não implica* em mudança correspondente na taxa de reparo e vice-versa); a falha de um componente não provoca a falha de outro (observe-se a consequência para as falhas de modo comum).

- Distribuição dos tempos de falha e reparo

Admite-se que os tempos de falha e reparo obedeçam a uma distribuição exponencial, ou seja, as taxas de falha e reparo têm valores constantes. Tal consideração é feita devido a evidências experimentais, caracterizando um modelo markoviano (o que implica em taxas de transição constantes). Uma consequência importante dessa consideração é expressa abaixo, sabendo-se que m é o tempo médio para a falha (MTTF ou tempo de operação) e r é o tempo médio de reparo (MTTR):

$$\lambda = \frac{1}{m} \qquad \mu = \frac{1}{r} \qquad (3.6)$$

3.2.3- Equações dos índices de confiabilidade

Com base nas hipóteses anteriormente citadas podem ser estabelecidas as equações gerais para cálculo dos índices de confiabilidade.

· Sendo $P(s)$ a probabilidade de um sistema estar em um estado de falha S , de duração média $R(s)$ e tempo médio para a falha $m(s)$ (MTTF), e sendo $\lambda(s)$ a taxa de falha do sistema, tem-se:

$$P(s) = \frac{R(s)}{m(s)} \quad \lambda(s) = \frac{1}{m(s)} \quad (3.7)$$

Deste modo:

$$P(s) = \lambda(s) * R(s) \quad (3.8)$$

3.2.3.1- Contingência simples (falha passiva ou ativa)

Seja agora um componente i de um sistema, no estado de falha S (falha passiva ou ativa).

A probabilidade de uma contingência simples (falha) será:

$$P(s) = P_i(s) * \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (1 - P_k(s)) * (1 - P_k(m)) \quad (3.9)$$

Onde:

N - número de componentes do sistema.

i - i -ésimo componente ($i=1,2,\dots, N$).

$P(s)$ - probabilidade de que o sistema tenha o i -ésimo componente no estado de falha S , e todos os demais operando.

$1 - P_k(s)$ - probabilidade de que nenhum componente k ($k \neq i$) esteja no estado de falha S .

$1 - P_k(m)$ - probabilidade de que nenhum componente k ($k \neq i$) esteja no estado de manutenção programada M .

$P_k(s)$ - probabilidade de que todos os elementos k ($k \neq i$) estejam no estado de falha S .

$P_k(m)$ - probabilidade de que todos os elementos k ($k \neq i$) estejam no estado de manutenção programada M .

Como $P_k(s)$ e $P_k(m)$ são muito menores que 1:

$$\prod_{k=1}^N (1 - P_k(s)) * (1 - P_k(m)) \approx 1 \quad (3.10)$$

para $k \neq i$

Logo:

$$P(s) = P_i(s) \quad P(s) = \lambda_i(s) * R_i(s) \quad (3.11)$$

Assim a probabilidade de ocorrência de cada contingência simples, que venha a causar falha (estado S) no sistema, é igual ao produto da taxa de falha do componente i pela duração média da permanência do componente i no estado de falha S .

Pode-se determinar a taxa de saída do sistema do estado S (devido à contingência simples, falha do componente i) $\mu(s)$.

$$\mu(s) = \mu_i(s) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \lambda_k(s) \quad (3.12)$$

Onde:

$\mu_i(s)$ - taxa de saída do componente i do estado de falha S (taxa de reparo do componente i).

$\lambda_k(s)$ - taxa de falha do componente k ($k \neq i$).

Como as taxas de reparo (μ) são por hipótese muito maiores do que as taxas de falha (λ), o tempo em que o componente está em reparo (r) é muito menor do que o tempo em que ele está em operação (m). Ou seja (vide equação 3.6):

$$m \gg n \Rightarrow \mu \gg \lambda \quad (3.13)$$

Assim:

$$\sum_{k=1}^N \lambda_k(s) \ll \mu_i(s) \quad (3.14)$$

$k \neq i$

Supondo que N seja um número finito (referente ao número de componentes de um sistema usual).

Logo:

$$\mu(s) = \mu_i(s) \quad (3.15)$$

Sabendo que o tempo de reparo (r) é a duração da falha ($R(s)$) e usando as equações 3.6 e 3.15, obtém-se a duração média de uma interrupção causada por falha ativa ou passiva do i -ésimo componente do sistema:

$$R(s) = \frac{1}{\mu(s)} = \frac{1}{\mu_i(s)} \quad (3.16)$$

$$R(s) = R_i(s) \quad (3.17)$$

A taxa de ocorrência (frequência) da interrupção será (equações 3.11 e 3.17).

$$\lambda(s) = \frac{P(s)}{R(s)} = \frac{\lambda_i(s) * R_i(s)}{R_i(s)} \quad (3.18)$$

$$\lambda(s) = \lambda_i(s) \quad (3.19)$$

3.2.3.2- Contingência dupla

Pode-se determinar também as equações de frequência e duração para contingência dupla. Tendo em vista a probabilidade desprezível de ocorrência de duas falhas ativas (seção 3.2.2.3), define-se um estado de falha T no qual existe um elemento do sistema de transmissão ou distribuição isolado para reparo (falha passiva).

A probabilidade do sistema estar com o componente i no estado S (falha ativa ou passiva) e o componente j no estado T (conforme definido no parágrafo anterior) e os demais operando será:

$$P_i(s,t) = P_i(s) * P_j(t) * \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^N (1 - P_k(s) - P_k(t)) * (1 - P_k(m)) \quad (3.20)$$

E a taxa de saída será:

$$\mu_i(s,t) = \mu_i(s) + \mu_j(t) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^N \lambda_k(t) \quad (3.21)$$

Considerando a inexistência de contingência tripla:

$$\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^N (1 - P_k(s) - P_k(t)) * (1 - P_k(m)) \approx 1 \quad (3.22)$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^N \lambda_k(t) \ll \mu_i(s) + \mu_j(t) \quad (3.23)$$

Com os resultados acima e usando as equações 3.8 e 3.16 como base:

$$P_i(s,t) = P_i(s) * P_j(t) = \lambda_i(s) * R_i(s) * \lambda_j(t) * R_j(t) \quad (3.24)$$

$$\mu_i(s,t) = \mu_i(s) + \mu_j(t) = \frac{1}{R_i(s)} + \frac{1}{R_j(t)} + \frac{1}{R_j(t)} \quad (3.25)$$

E a duração da interrupção será:

$$R(s,t) = \frac{R_i(s) * R_j(t)}{R_i(s) + R_j(t)} \quad (3.26)$$

A frequência de interrupção será (equações 3.18, 3.24 e 3.26):

$$\lambda(s,t) = \frac{P(s,t)}{R(s,t)} \quad (3.27)$$

$$\lambda(s,t) = \lambda_i(s) * \lambda_j(t) * (R_i(s) + R_j(s)) \quad (3.28)$$

3.2.3.3- Contingência dupla envolvendo manutenção programada

De forma semelhante obtêm-se as equações de frequência e duração para o caso de o componente j estar em manutenção programada (estado M), e o componente i estar no estado S.

$$\lambda(s,m) = \lambda_i(s) * \lambda_j(m) * (R_i(s) + R_j(m)) \quad (3.29)$$

$$R(s,m) = \frac{R_i(s) * R_j(m)}{R_i(s) + R_j(m)} \quad (3.30)$$

Uma análise das equações 3.29 e 3.30 será realizada na seção 3.3.

3.2.3.4- Falha temporária simples, e falha ativa conjugada com disjuntor preso

As falhas temporárias (seção 3.2.1) têm a frequência de interrupção calculadas da mesma forma que para falhas passivas, sendo que a duração é igual ao tempo de chaveamento dos elementos normalmente abertos que isolam a falha.

No caso de uma falha ativa conjugada com um disjuntor preso, a frequência de interrupção é calculada como se para uma contingência simples, multiplicando o resultado

pela probabilidade de disjuntor preso. A duração da interrupção é igual à duração da falha ativa.

As horas anuais de interrupção dos diferentes estados são calculadas multiplicando-se as frequências e durações respectivas. Para obter a indisponibilidade total do sistema basta somar todas as contribuições.

3.2.4- Diagrama do modelo de operação

Na figura 3.8 abaixo é mostrado o modelo completo de operação de um componente, apresentando a seqüência de eventos com todos os tipos de falha [11]:

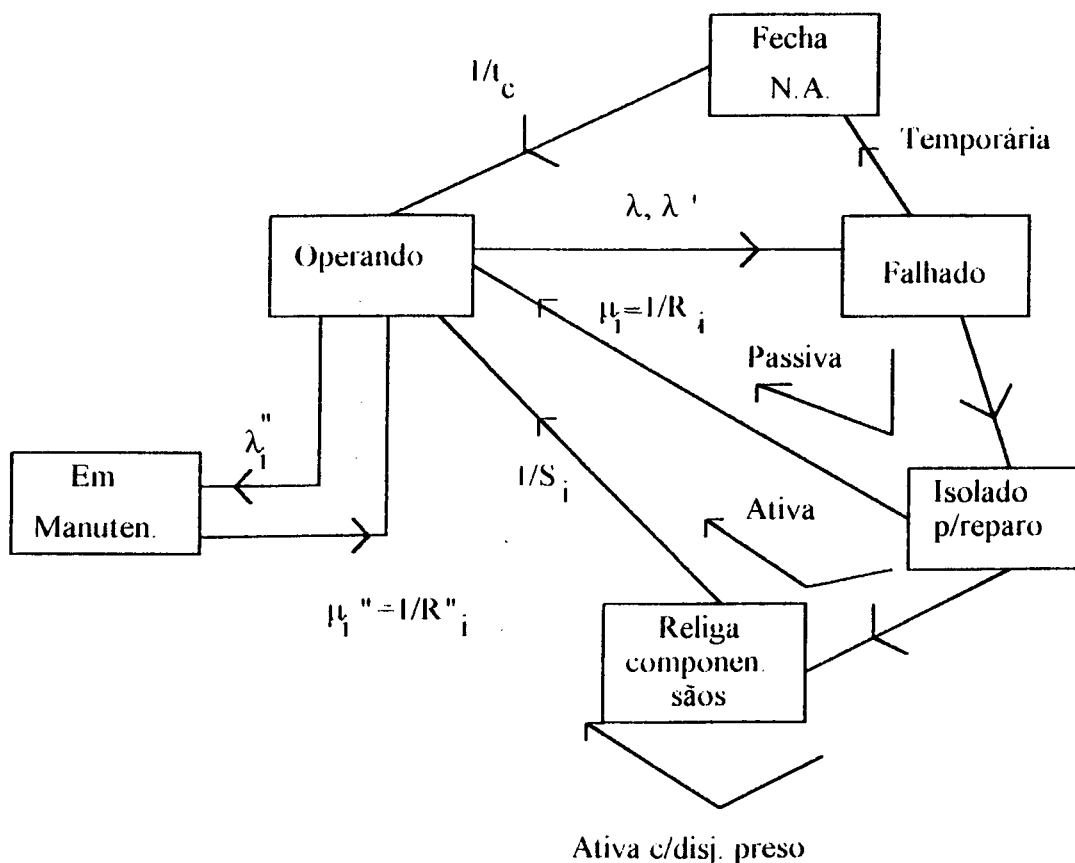


Figura 3.8- Modelo de operação de um componente de acordo com a metodologia CST

Onde:

λ_1 - taxa de falha passiva.

λ'_i - taxa de falha ativa (diferente de λ_i somente para componentes dinâmicos).

λ''_i - taxa de manutenção programada

R_i - tempo médio de reparo de uma falha passiva.

S_i - tempo necessário para isolamento do componente e religamento dos elementos não fallhados.

R''_i - tempo necessário para a manutenção programada do componente.

t_c - tempo de chaveamento de elementos normalmente abertos.

3.3- APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A seguir serão apresentados outros tópicos necessários para a aplicação da metodologia.

3.3.1- Representação do sistema

Um sistema real de transmissão, ou de distribuição, pode ser representado por um grafo, baseado em seu arranjo físico. Dessa forma os ramos do grafo serão os componentes do sistema (barramentos, disjuntores, linhas de transmissão), e os nós serão os pontos de interligação entre os equipamentos (e os pontos fonte e de carga).

Numeram-se os nós, e posteriormente descrevem-se os ramos, enumerando-os também, citando os nós inicial e final de cada um, indicando ainda sua orientação (uni ou bidirecionais) e finalmente declarando seu modo de operação: normalmente fechado ou aberto.

O algoritmo computacional utilizado pode lidar com até 300 nós e 500 ramos, 20 pontos fonte e até 20 pontos de carga.

Nas figuras 3.9 e 3.10 são mostrados uma subestação simplificada de distribuição ([8] e [11]), que pode ser vista como um sistema de transmissão, e seu grafo, numerado e orientado, pronto para a aplicação da metodologia.

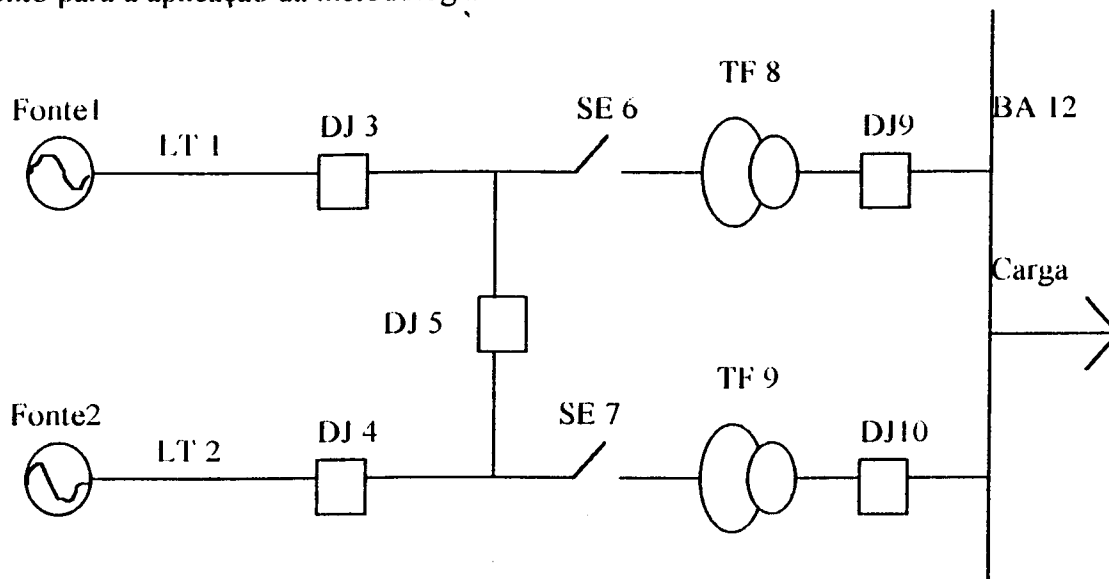


Figura 3.9- Subestação simplificada de distribuição [8]

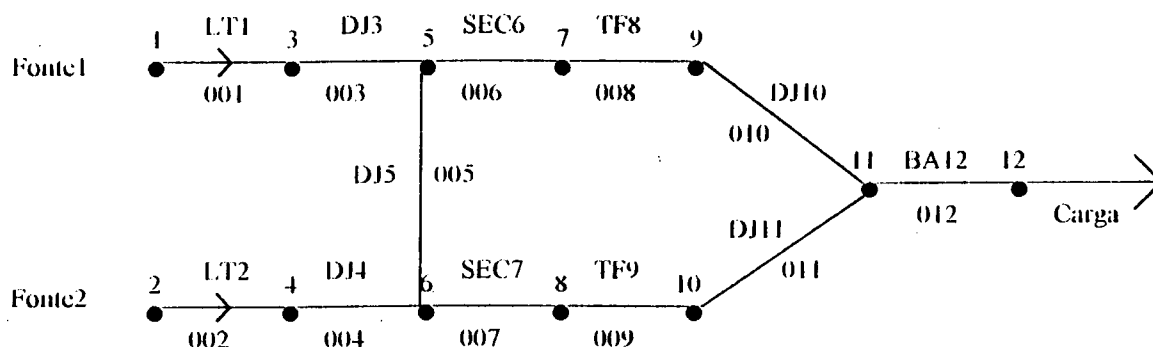


Figura 3.10- Grafo do sistema [8]

3.3.2- Método dos cortes mínimos

O método dos cortes mínimos é uma técnica que busca identificar um conjunto de elementos que possam causar no sistema a interrupção de todos os caminhos existentes entre fonte(s) e carga(s).

Algumas definições são necessárias para a correta aplicação da metodologia[28]:

-caminho: conjunto de ramos orientados ou não que formam uma ligação entre a fonte e a carga, na direção permitida dos ramos orientados (um caminho na figura 3.10 poderia passar por LT2, DJ4, DJ5, mas nunca percorrer o sentido contrário).

-caminho mínimo: caminho em que nenhum nó do grafo é atravessado mais de uma vez (o algoritmo computacional [11] usa a topologia da rede para montar os caminhos mínimos).

-corte: conjunto de ramos que uma vez retirados do sistema interrompem todos os caminhos existentes entre fonte e carga.

-corte mínimo: é o corte que não tem nenhum subconjunto de ramos que por sua vez formem corte; pode-se identificar vários cortes mínimos na figura 3.10: contingência simples (BA12), contingências duplas (LT1 e LT2, TF8 e TF9, etc).

O critério de sucesso do sistema (e de cada ponto de carga) é o da continuidade do fornecimento, e considerando que as falhas dos componentes são independentes:

- a confiabilidade do sistema é dada pela probabilidade de que pelo menos um caminho esteja operativo.

- a probabilidade de falha do sistema é dada pela probabilidade de falha de todos os elementos de pelo menos um corte mínimo.

Assim, para determinar-se os modos de falha do sistema, basta obter todos os seus cortes mínimos. Posteriormente usam-se os modelos de confiabilidade apropriados para cada um, com o intuito de calcular a contribuição aos índices de frequência e duração das interrupções.

Os modos de falha abordados neste trabalho são:

- Cortes de primeira ordem: um componente sofre uma falha passiva, ativa ou temporária.

- Cortes de segunda ordem: dois componentes sofrem falhas passivas, falha passiva de um componente quando outro está em manutenção programada, falha ativa de um componente quando outro está isolado para reparo (sofreu falha passiva), falha ativa de um componente quando outro está em manutenção programada, falha ativa de um componente com um disjuntor preso, falha temporária de um componente quando outro está isolado para reparo (sofreu falha passiva), falha temporária de um componente quando outro está em manutenção programada.

Para a aplicação desta metodologia as informações presentes na figura 3.8 (taxas de falha, tempos de reparo, tempos de chaveamento, e também a probabilidade de disjuntor preso) são imprescindíveis.

3.3.3- Expressões dos cortes mínimos para os vários modos de falha

Antes de apresentar as equações dos cortes mínimos para cada modo de falha, é importante ressaltar algumas variáveis que serão usadas ao longo de todo este item:

- U_k , R_k , λ_k - contribuição às horas anuais de interrupção, duração esperada da interrupção, e contribuição à frequência de interrupção do ponto de carga causadas por falhas passivas ou falhas temporárias.

- U'_k , R'_k , λ'_k - contribuição às horas anuais de interrupção, duração esperada da interrupção, e contribuição à frequência de interrupção do ponto de carga causadas por falha ativa ou por falha ativa conjugada com falha passiva, ou por falha ativa conjugada com um disjuntor preso.

- U''_k , R''_k , λ''_k - contribuição às horas anuais de interrupção, duração esperada da interrupção, e contribuição à frequência de interrupção do ponto de carga causadas por falha passiva, ativa ou temporária de um componente quando outro está em manutenção programada.

3.3.3.1- Falhas Passivas

a) Falha de um componente i.

Das equações 3.17 e 3.19:

$$\lambda_k = \lambda_i \quad (\text{falhas/ano}) \quad (3.31)$$

$$R_k = R_i \quad (\text{horas}) \quad (3.32)$$

$$U_k = \lambda_i * R_i \quad (\text{horas/ano}) \quad (3.33)$$

b) Falha de dois componentes (i,j).

Das equações 3.26 e 3.28:

$$\lambda_k = \lambda_i * \lambda_j * ((R_i + R_j)/8760.) \quad (3.34)$$

$$R_k = \frac{R_i * R_j}{R_i + R_j} \quad (3.35)$$

$$U_k = \lambda_k * R_k \quad (3.36)$$

A princípio poderia se pensar que os resultados teriam que ser multiplicados por dois, uma vez que tanto pode ocorrer o evento (i,j) quanto (j,i). Deve-se observar porém que o evento (i,j) é idêntico ao evento (j,i), neste caso, não havendo necessidade de contar os resultados duas vezes.

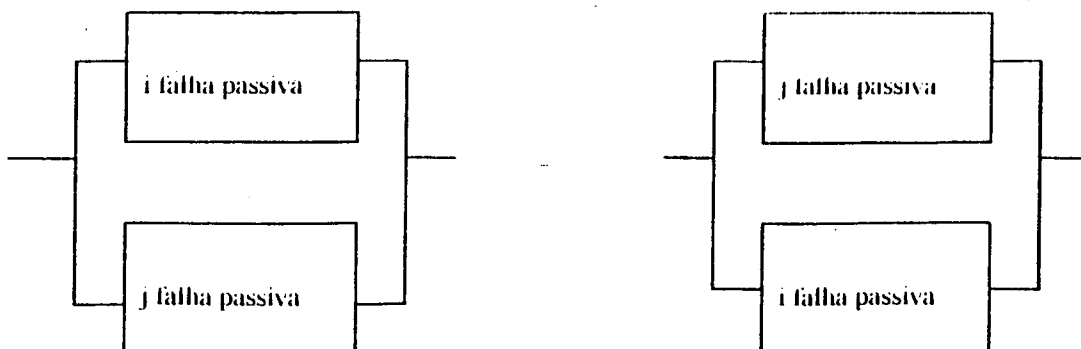


Figura 3.11- Eventos idênticos

c) Falha de um componente i quando há outro componente j tem manutenção programada.

Da equação 3.29, considerando a possibilidade de ocorrência do evento (i,j) ou (j,i) :

$$\lambda''_k = \lambda_i * \lambda''_j * \left(\frac{R_i + R''_j}{8760} \right) + \lambda_j * \lambda''_i * \left(\frac{R_j + R''_i}{8760} \right)$$

$$\lambda''_k = \lambda_i * \lambda''_j * \frac{R_i}{8760} + \lambda_i * \lambda''_j * \frac{R''_j}{8760} + \lambda_j * \lambda''_i * \frac{R_j}{8760} + \lambda_j * \lambda''_i * \frac{R''_i}{8760}$$

(I) (II) (III) (IV)

(I)-estado em que i falha, j entra em manutenção programada;

(II)-estado em que j está em manutenção programada, i falha;

(III)-estado em que j falha, i entra em manutenção programada;

(IV)-estado em que i está em manutenção programada, j falha.

Devido à hipótese de não se iniciar manutenção programada com algum componente falhado no sistema (seção 3.2.2.6), eliminam-se os termos (I) e (III), e a equação reduz-se a [11]:

$$\lambda''_k = \lambda_i * \lambda''_j * \left(\frac{R''_j}{8760} \right) + \lambda_j * \lambda''_i * \left(\frac{R''_i}{8760} \right) \quad (3.37)$$

Da equação 3.30:

$$R''_k = \frac{\lambda_i * \lambda''_j * \left(\frac{R''_j}{8760} \right)}{\lambda''_k} * \frac{R_i * R''_j}{R_i + R''_j} + \frac{\lambda_j * \lambda''_i * \left(\frac{R''_i}{8760} \right)}{\lambda''_k} * \frac{R_j * R''_i}{R_j + R''_i} \quad (3.38)$$

$$U''_k = \lambda''_k * R''_k \quad (3.39)$$

3.3.3.2- Falhas ativas

a) Falha ativa de um componente i.

$$\lambda'_k = \lambda_i \quad (3.40)$$

$$R'_k = S_i \quad (3.41)$$

$$U'_k = \lambda'_k * R'_k \quad (3.42)$$

b) Falha ativa de um componente i quando um outro j está isolado para reparo.

É interessante notar que somente é admitido o evento (i,j) (i sofre falha ativa estando j isolado para reparo), ao contrário das falhas passivas em que o evento (j,i) também é considerado. Isso ocorre devido à natureza da falha ativa, substancialmente diferente da passiva. A falha passiva retira de operação apenas o componente falhado enquanto a falha ativa retira outros componentes de operação além daquele que falhou. Portanto, no modo falha ativa o evento (i,j) é distinto de (j,i). Uma falha ativa em j estando i isolado para reparo, pode não ser um corte mínimo. Esta observação também é válida para falha ativa e manutenção programada (já que esta tem um efeito semelhante à falha passiva, retirando apenas o componente em reparo).

$$\lambda'_k = \lambda_i * \lambda_j * \left(\frac{S_i + R_j}{8760} \right) \quad (3.43)$$

$$R'_k = \frac{S_i * R_j}{S_i + R_j} \quad (3.44)$$

$$U'_k = \lambda'_k * R'_k \quad (3.45)$$

c) Falha ativa de um componente i quando um outro j está em manutenção programada.

$$\lambda''_k = \lambda'_i * \lambda''_j * \left(\frac{S_i + R''_j}{8760} \right) \quad (3.46)$$

$$R''_k = \frac{S_i * R''_j}{S_i + R''_j} \quad (3.47)$$

$$U''_k = \lambda''_k * R''_k \quad (3.48)$$

d) Falha ativa de um componente i com um disjuntor j preso.

$$\lambda'_k = \lambda'_i * p_j \quad (3.49)$$

$$R'_k = S_i \quad (3.50)$$

$$U'_k = \lambda'_k * R'_k \quad (3.51)$$

Onde p_j é a probabilidade do disjuntor j ficar preso quando chamado a operar.

3.3.3.3- Falhas temporárias

A falha temporária é uma falha passiva que pode ser sanada (isolada) pelo chaveamento de componentes normalmente abertos existentes no sistema (ver seção 3.2.3.4). Assim, a frequência de interrupção é calculada como para falhas passivas, e a duração da interrupção é

igual ao tempo de chaveamento dos elementos normalmente abertos. Se o sistema não possuir componentes N A, este modo de falha não será analisado.

a) Falha temporária de um componente i.

$$\lambda_k = \lambda_i \quad (3.52)$$

$$R_k = t_c \quad (3.53)$$

$$U_k = \lambda_k * R_k \quad (3.54)$$

b) Falha temporária de um componente i quando um outro componente j está isolado para reparo.

Aqui cabe consideração semelhante ao caso da falha ativa e componente isolado para reparo. No evento (i,j), o componente i sofre uma falha temporária estando o componente j isolado para reparo. Se este evento for um corte mínimo, não implica em que o evento (j,i) também o será. Esta observação também é válida para o caso seguinte (envolvendo manutenção).

$$\lambda_k = \lambda_i * \lambda_j * \left(\frac{R_i + R_j}{8760} \right) \quad (3.55)$$

$$R_k = t_c \quad (3.56)$$

$$U_k = \lambda_k * R_k \quad (3.57)$$

c) Falha temporária de um componente i quando um outro j esta em manutenção programada.

$$\lambda_k = \lambda_i * \lambda_j'' * \left(\frac{R_j'' + t_c}{8760} \right) \quad (3.58)$$

Devido ao fato do tempo de chaveamento ser geralmente muito menor do que a duração da manutenção programada, a equação 3.58 reduz-se a:

$$\lambda_k = \lambda_i * \lambda''_j * R''_j \quad (3.59)$$

$$R_k = t_c \quad (3.60)$$

$$U_k = \lambda_k * R_k \quad (3.61)$$

3.3.3.4- Índices totais para o ponto de carga

Após encontrados todos os cortes mínimos para todos os modos de falha anteriores, calculada a contribuição de cada um, pode-se obter os valores totais dos índices para o ponto de carga: λ_T (taxa total de interrupção), U_T (horas totais de interrupção anual), e R_T (duração média de uma interrupção).

$$\lambda_T = \sum_{k=1}^{N1} \lambda_k + \sum_{k=1}^{N2} \lambda'_k + \sum_{k=1}^{N3} \lambda''_k \quad (3.62)$$

$$U_T = \sum_{k=1}^{N1} U_k + \sum_{k=1}^{N2} U'_k + \sum_{k=1}^{N3} U''_k \quad (3.63)$$

$$R_T = \frac{U_T}{\lambda_T} \quad (3.64)$$

Onde: N1 é o número de cortes mínimos provocados por falhas passivas e temporárias, N2 é o número de cortes mínimos provocados por falhas ativas e N3 é o número de cortes mínimos provocados por falhas passivas, ativas ou temporárias quando um outro componente está em manutenção programada.

3.3.3.5- Índices totais para o sistema

Uma vez que todos os pontos de carga foram analisados, se for requerido, podem ser calculados os índices de confiabilidade para o sistema. Considerando que a perda de qualquer ponto de carga representa uma perda (falha) para o sistema, e que os cortes mínimos já foram definidos para cada ponto, basta apenas eliminar as intersecções entre os diferentes conjuntos, e então calcular os índices totais pela metodologia exposta anteriormente.

3.4- CONCLUSÃO

A metodologia CST é uma ferramenta extremamente útil para a avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão.

Representa a operação de um sistema elétrico com elevado grau de realismo, considerando a maioria das condições que o influenciam na prática. Trata de diversos modos de falha, analisa os efeitos da atuação da proteção e da manutenção programada de uma forma simples e muito flexível.

As hipóteses simplificadoras da metodologia, conforme foram vistas na seção 3.2.2, não constituem limitações à sua aplicação. Refletem aproximações de ordem prática, cuja validade permite diminuir consideravelmente o grau de complexidade da técnica.

A utilização da técnica dos cortes mínimos para a identificação das contingências que interrompem o fornecimento permite o armazenamento permanente das equações das contribuições. Assim, vários sistemas diferentes (ou várias configurações do mesmo sistema) podem ser analisados rapidamente, indicando a metodologia para uso em estudos de planejamento.

A mesma flexibilidade que possibilita o uso da metodologia CST para estudos de planejamento de sistemas de transmissão, permite a sua utilização em estudos de distribuição [15].

Conjugada à consideração de incertezas nos dados, a técnica representará ainda melhor os sistemas (sejam eles de transmissão ou distribuição), obtendo resultados mais realistas.

CAPÍTULO 4

TRATAMENTO DE INCERTEZAS

4.1- INTRODUÇÃO

O objetivo de qualquer técnica de avaliação da confiabilidade em geral, e de sistemas de potência em particular, é a estimação de índices de confiabilidade de um sistema complexo. No caso de sistemas de potência, estes índices poderiam ser frequência de interrupções, duração da interrupção, probabilidade de falha, etc, que seriam usados como base para a tomada de decisões em estudos de planejamento (mediante a comparação de diversas alternativas).

Conforme foi visto no Capítulo 1, o banco de dados é, atualmente um dos principais limitadores dos métodos de avaliação da confiabilidade. O conjunto de dados precisa ser estatisticamente suficiente (em quantidade tal que assegure a sua representatividade) e o mais confiável possível (minimização de erros no registro e compilação).

Os dados de confiabilidade dos componentes de um sistema são geralmente provenientes de duas fontes [19]: testes efetuados em amostras, ou registros de campo. Em ambos os casos, sempre haverá incerteza sobre os resultados obtidos (sempre haverá um desvio-padrão em seus valores), podendo ser tratados como variáveis aleatórias. Os dados podem ser apresentados para futuros estudos de três formas: somente pelos valores médios, pelos valores médios e variâncias, ou pela função densidade de probabilidade (pdf). A terceira opção é a mais completa e adequada, mas nem sempre possível de ser utilizada: torna-se difícil, muitas vezes, identificar a pdf seguida pelos dados. A representação dos dados (variáveis aleatórias) através da média e da variância não é tão representativa, mas apresenta um grau de realismo muito maior do que somente pelo valor médio, visto que efetivamente considera a existência de incertezas nos dados.

Pelo que foi exposto acima e no Capítulo 1, pode-se inferir que todo o estudo que utilizar dados operativos de componentes para avaliação da confiabilidade deve considerar a existência de incertezas e adotar um modelo matemático que as levem em conta e venham a refletir seus efeitos nos índices calculados. Em outras palavras, torna-se necessária uma representação mais completa do que o valor esperado, tanto para os dados como para os resultados (índices) do modelo matemático de avaliação da confiabilidade de um sistema.

4.2- MODELOS DE TRATAMENTO DE INCERTEZAS

Existem basicamente duas abordagens que podem ser usadas para tratar incertezas nos dados, refletindo-as adequadamente nos índices de confiabilidade calculados: simulação Monte Carlo e métodos analíticos. Em ambos os casos aproximações e hipóteses (baseadas em aspectos práticos ou estatísticos) podem ser efetuadas de modo a simplificar substancialmente o problema.

4.2.1- Simulação Monte Carlo

As técnicas que utilizam a simulação Monte Carlo (SMC) buscam simular a operação real do sistema ao longo do tempo. Isso é feito mediante sorteio de amostras representativas do sistema. A referência [14], e a segunda abordagem da referência [19] (ver seção 2.3) são exemplos de aplicação de simulação Monte Carlo em sistemas de transmissão e distribuição.

Uma descrição pormenorizada desta técnica pode ser encontrada na referência [32], contudo os pontos principais podem ser aqui citados:

- a estrutura do sistema é conhecida, ou seja sabe-se como os diversos componentes relacionam-se entre si de modo a produzir a saída do sistema. Na figura 4.1 é apresentado um modelo de uma estrutura de sistema [32].

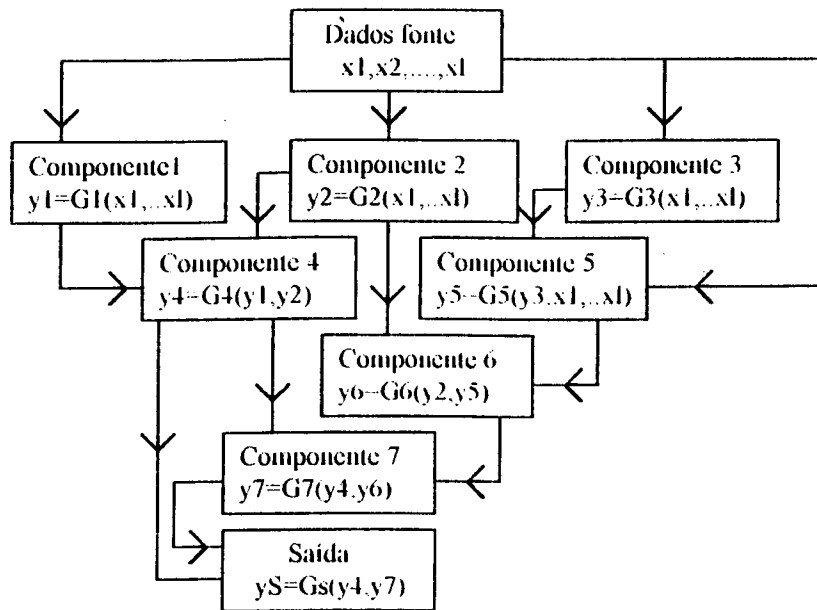


Figura 4.1- Estrutura de um sistema.

- as variáveis aleatórias x_i que determinam a performance dos componentes têm suas distribuições de probabilidades $F_i(x_i)$ conhecidas (por exemplo tempos para falha e reparo com distribuição exponencial).
- podem ser geradas n amostras (n realizações de cada x_i) de tal forma que o conjunto de amostras de cada x_i constitua uma distribuição correspondente à $F_i(x_i)$. A geração da amostra pode ser feita usando-se uma seqüência de números aleatórios, e substituí-los em $F_i(x_i)$ como probabilidades, e obtendo assim os valores de x_i .
- se o número de amostras n for suficientemente grande, o conjunto de valores da saída refletirá a distribuição do desempenho do sistema (que a princípio é desconhecida).

Um fluxograma simplificado da técnica é apresentado na figura 4.2 [32]

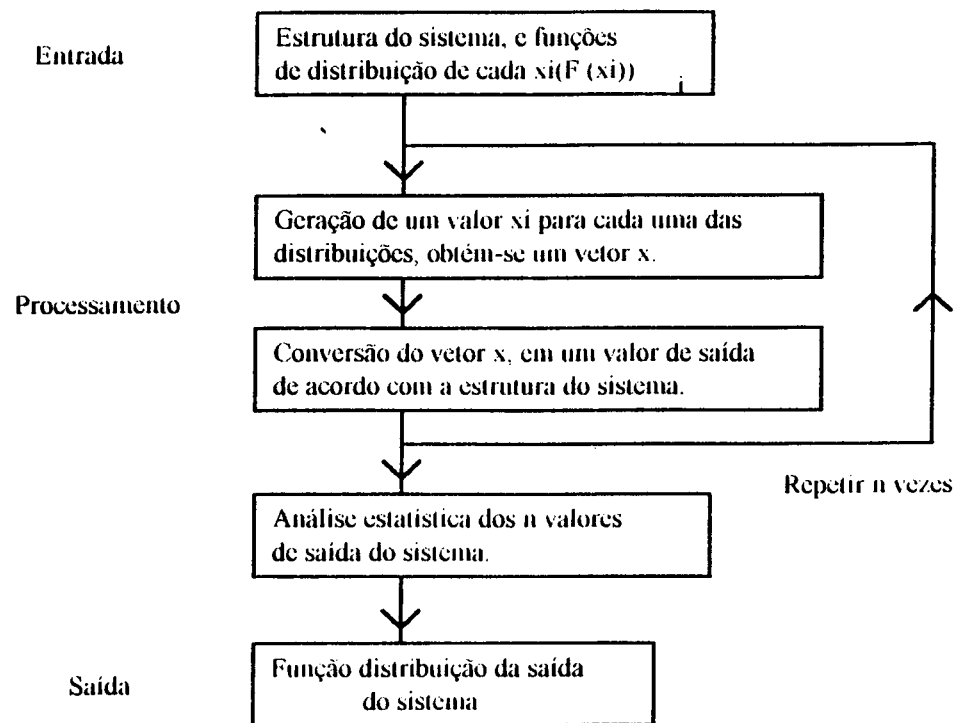


Figura 4.2- Fluxograma simplificado da simulação Monte Carlo

Três fatores vão determinar a acuracidade da simulação Monte Carlo [32]:

- 1) a fidedignidade do conhecimento da estrutura do sistema, isto é se a estrutura identificada corresponde à real.
- 2) a precisão com que as funções $F_i(x_i)$ representam as distribuições reais das variáveis x_i .
- 3) o número de valores amostrados para cada $F_i(x_i)$, o qual será função do risco (probabilidade) que se admitirá de que os resultados se afastem do valor real de uma certa quantidade (o erro).

A simulação Monte Carlo é largamente aplicada quando a experimentação do sistema não pode ser feita, ou quando o modelo do sistema não pode ser resolvido analiticamente. Apresenta como principal vantagem permitir a avaliação do comportamento do sistema pelo tempo que for necessário, sem a necessidade de usar somente dados de testes reais ou registros de campo. Trata incertezas da forma mais completa, lidando com a função

distribuição de probabilidade dos dados (ou sua função densidade de probabilidade), obtendo os resultados da performance do sistema na mesma forma. Pode-se tratar com diversos riscos de erro, e vários algoritmos e tabelas de números aleatórios (usados na geração das amostras).

As desvantagens da técnica não podem ser esquecidas. Nem sempre é possível conhecer com a necessária precisão a estrutura do sistema (relação entrada-saída). Outro problema que surge é o da identificação das distribuições das variáveis que determinam a performance dos componentes (igualmente uma preocupação nos modelos analíticos, mas que não é tão restritiva, uma vez que nas técnicas analíticas, geralmente se busca a confiabilidade do sistema no estado estacionário-ver seção 3.2.2.8). Se esta identificação for feita erroneamente, levará a resultados sem valor. Isso é particularmente importante porque distribuições como Log-Normal, Gamma ou Weibull podem parecer todas adequadas a um conjunto de dados, apenas trocando-se alguns de seus parâmetros.

Contudo, o principal problema da simulação Monte Carlo é a geração das amostras, em número suficiente para refletir a distribuição de probabilidades real da saída dos sistema. Não obstante a utilização generalizada de computação digital, as simulações envolvendo sistemas complexos e de grande porte (um dos principais interesses deste trabalho) podem tomar muito tempo de programação e execução. Quando se deseja realizar estudos de planejamento, em que vários sistemas são avaliados como opções, ou mesmo diferentes configurações do mesmo sistema, as dificuldades multiplicam-se: cada alteração, por menor que seja, cria um novo sistema que deve ser analisado desde o início (nova "amostragem", nova computação dos resultados, novos testes estatísticos, etc). Claro que em estudos analíticos isso também terá que ser feito, mas o tempo dispendido poderá ser consideravelmente menor.

4.2.2- Métodos Analíticos

Nos métodos analíticos busca-se uma modelagem matemática da relação entrada e saída do sistema, de modo a encontrar equações que permitam calcular a performance do sistema. Para tanto, aplicam-se ao problema real simplificações e aproximações (de caráter prático,

matemático, estatístico, etc), as quais tornam possível sua representação através de equações relativamente simples, permitindo uma programação e execução rápidas em computador digital. As aproximações usadas dependerão muito do objetivo do estudo e das condições de cada sistema sob análise.

No que tange à avaliação da confiabilidade os métodos analíticos constituem a maioria das técnicas existentes (ver seção 2.2), principalmente quando não há consideração de incertezas nos dados. Mesmo que exista essa consideração, modelos analíticos costumam ser usados ([19-22]). Pode-se identificar, grosso modo, duas abordagens para o tratamento de incertezas nos dados:

- busca-se a função densidade (ou distribuição) de probabilidade dos índices.
- estabelecem-se limites de confiança para os índices.

Em ambos os casos fazem-se hipóteses acerca das distribuições seguidas pelos dados, e em alguns deles ([20-22]) sobre a distribuição seguida pelos índices de confiabilidade também.

4.2.2.1- Obtenção das distribuições dos índices

Os métodos têm por objetivo encontrar a função densidade (pdf) ou distribuição de probabilidade dos índices de confiabilidade, usando para tal equações matemáticas que as relacionam com as distribuições dos dados. Normalmente essas equações são fórmulas para cálculo de momentos dos índices de confiabilidade (que são variáveis aleatórias), e a partir deles determina-se a pdf.

Exemplos típicos dessa abordagem são as referências [21] e [22]. Em ambas, porém, determina-se como condição que a frequência das interrupções segue uma distribuição de Poisson, e em [22] que a duração da interrupção segue uma distribuição Gamma. Uma descrição sucinta de ambos os trabalhos já foi feita anteriormente, não obstante, duas considerações precisam ainda ser feitas:

- o preço a ser pago pela obtenção das pdf's dos índices (informação mais completa) é um número razoável de aproximações imprescindíveis para a aplicação do método, implicando em outras restrições não formalmente citadas, como o fato de que a densidade de probabilidade dos índices deve ser unimodal, para permitir a aproximação pelos primeiros momentos centrais por exemplo [21].
- embora as aproximações simplifiquem o problema, o tratamento matemático necessário para a obtenção das pdf's dos índices ainda é considerável, particularmente na referência [22].

4.2.2.2- Obtenção de intervalos de confiança para os índices

Neste caso os métodos buscam obter os valores esperados e desvios-padrão (ou variâncias) dos índices, para, de acordo com um nível de significância adotado, estabelecer seus intervalos de confiança (embora em algumas técnicas [18] o desvio-padrão não seja usado). Os métodos utilizam tabelas e gráficos [18] ou equações [19-20] para determinar o desvio-padrão e/ou os limites de confiança.

A questão que surge como capital é que para a determinação dos intervalos de confiança de um índice, deve-se supor que ele segue alguma distribuição conhecida, para que possam ser usadas tabelas ou equações conhecidas. Sendo assim, recai-se nas desvantagens dos métodos anteriores, ou seja, a exigência de que os índices seguissem alguma distribuição determinada. Realmente em [18] as variáveis de interesse (tempos para a falha e reparo) devem ser exponencialmente distribuídas, o que geralmente ocorre na prática; em [20] o número de interrupções (frequência de falha) segue uma Poisson e a duração da falha uma Gamma.

Não obstante tudo o que foi dito no parágrafo anterior, as aproximações usadas nos métodos aqui enfocados não são tão fortes, e tampouco implicam em simplificações grosseiras nos modelos.

4.3- DETERMINAÇÃO DO MODELO DE TRATAMENTO DAS INCERTEZAS

Passa-se agora a definir as características desejadas de uma metodologia de tratamento de incertezas. O objetivo é selecionar entre as opções disponíveis, a que seja mais adequada aos objetivos deste trabalho. Primeiramente serão estabelecidos os principais requisitos da técnica de tratamento de incertezas, e em seguida apresentadas mais pormenorizadamente as principais opções.

4.3.1- Características das Metodologias

No presente trabalho dispõe-se de uma metodologia analítica de avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão/distribuição, direcionada para estudos de planejamento: a metodologia CST. Como esta metodologia tem apresentado um bom desempenho, seria extremamente interessante associar incertezas nos dados a essa técnica. Portanto, o método de tratamento de incertezas a ser usado neste trabalho deverá ser analítico.

Uma outra característica importante da metodologia CST é a utilização do método dos cortes mínimos para a identificação dos eventos que causam falha no sistema, para o posterior cálculo de suas contribuições usando os modelos de confiabilidade adequados. Assim, torna-se desejável que o método de tratamento de incertezas seja compatível com cortes mínimos.

Dada a própria natureza da metodologia CST, analítica e ocupada em apenas obter os valores médios dos índices, e as restrições um tanto sérias das técnicas que obtêm as pdf's dos índices, prefere-se optar pela determinação de intervalos de confiança. A princípio, parece ser a técnica analítica mais adequada para uso em conjunção com a metodologia dos cortes mínimos, dada a sua maior flexibilidade e simplicidade.

Das várias técnicas descritas na seção 2.3, após fazer-se a filtragem baseada nas considerações anteriores, foram selecionadas a técnica de González-Urdaneta e Cory [19], e a de Patton [20].

4.3.1.1- Metodologia de Patton [20]

Nominalmente a técnica de Patton [20] busca obter as distribuições de probabilidade da frequência (número) e duração das interrupções. Contudo, como se admite que sigam a distribuição de Poisson e Gamma, respectivamente, e se busca obter a probabilidade de ocorrência de um dado número N de falhas, e a probabilidade da duração das interrupções ser maior do que um certo valor, essa metodologia configura-se como obtenção de limites de confiança.

Para que as aproximações do parágrafo anterior sobre as distribuições seguidas pelos índices sejam válidas, exige-se que o número de cortes mínimos seja razoavelmente grande, ou os tempos para a falha e reparo sejam exponencialmente distribuídos. As equações para cálculo da frequência e duração da falha, considerando cortes mínimos de até segunda ordem são:

Cortes de primeira ordem

$$f_i = \lambda_j \quad (4.1)$$

$$r_i = r_j \quad (4.2)$$

Cortes de segunda ordem

$$f_i = \lambda_j * \lambda_k * \left(\frac{\Gamma_j * \Gamma_k}{8760} \right) \quad (4.3)$$

$$r_i = \frac{\Gamma_j * \Gamma_k}{\Gamma_j + \Gamma_k} \quad (4.4)$$

Onde:

f_i, r_i - frequência e duração da interrupção devida ao corte mínimo i .

λ_j, λ_k - taxas de falha dos componentes j e k do corte mínimo i .

r_j, r_k - duração da falha dos componentes j e k .

Além disso:

$$f_s = \sum f_i \quad (4.5)$$

$$r_s = \sum \frac{f_i * r_i}{f_s} \quad (4.6)$$

Onde:

f_s - frequência total de falha (soma das frequências de cada corte mínimo).

r_s - duração média da falha no sistema.

Sendo a frequência (ou número) de interrupções do sistema a variável aleatória N que segue uma distribuição de Poisson, a probabilidade de ocorrência de n falhas é:

$$P(N = n) = \frac{f_s^n * e^{-f_s}}{n!} \quad (4.7)$$

Sendo R_s a variável aleatória duração da interrupção do sistema, que segue uma distribuição Gamma, o valor esperado é calculado pela equação (4.6), e a variância será:

$$V(R_s) = \frac{2}{f_s} * \sum_{i=1}^l f_i * r_i^2 - r_s^2 \quad (4.8)$$

Onde l é o número de cortes mínimos.

Os parâmetros α e β da distribuição Gamma seguida pela variável $R(s)$ podem ser obtidas por:

$$\alpha = \frac{V(R_s)}{r_s} \quad (4.9)$$

$$\beta = \frac{r_s^2}{V(R_s)} \quad (4.10)$$

Geralmente, tabelas da distribuição Gamma não são disponíveis, sendo conveniente a sua transformação em uma distribuição Chi-quadrada, que é um caso particular da Gamma com α igual a 2 e $2*\beta$ graus de liberdade. Usando as expressões de [29], os limites de confiança tornam-se:

$$P\left\{\frac{\alpha}{2} * \chi_{gl,\gamma/2}^2 \leq R_s \leq \frac{\alpha}{2} * \chi_{gl,1-\gamma/2}^2\right\} = 1 - \gamma \quad (4.11)$$

Onde:

γ - nível de risco.

gl - graus de liberdade da distribuição Chi-quadrada ($2*\beta$).

$\chi_{gl,\gamma/2}^2$, $\chi_{gl,1-\gamma/2}^2$ - percentis da distribuição Chi-quadrada provenientes de tabelas.

4.3.1.2- Metodologia analítica de González-Urdaneta e Cory [19]

A técnica proposta por González-Urdaneta e Cory na primeira parte da referência [19], visa a obtenção dos limites de confiança aproximados da probabilidade e frequência de falha do sistema.

Algumas considerações devem ser feitas:

- as taxas de falha e reparo são constantes (os tempos para a falha e reparo seguem uma distribuição exponencial).
- o sistema é composto de componentes independentes

- existem estimativas das taxas de falha e reparo, provenientes de testes anteriores.
- cada componente pode ser representado por um modelo a dois estados.
- uma expressão matemática relacionando a confiabilidade do sistema com a dos componentes pode ser estabelecida (cortes mínimos).
- o sistema está em estado estacionário (a probabilidade de residir em determinado estado não varia no tempo).
- as taxas de reparo dos componentes são muito maiores do que as taxas de falha.

Lembrando a técnica dos cortes mínimos, a indisponibilidade total (em horas/ano) e a frequência de falha de um componente j será (sabendo que existem 8760 horas em um ano):

$$U_{jd} = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * 8760. \quad F_f = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * \mu_j \quad (4.12)$$

E a indisponibilidade total e frequência de falha do sistema serão:

$$U_f = \sum_{i=1}^n \prod_{j \in i} U_{jd} \quad (4.13.a)$$

$$F_f = \sum_i \left[\left(\prod_{j \in i} \frac{U_{jd}}{8760} \right) * \left(\sum_{j \in i} \mu_j \right) \right] \quad (4.13.b)$$

Onde:

U_{jd} - indisponibilidade do componente j .

λ - taxa de falha do componente j .

μ_j - taxa de reparo do componente.

i - designação do corte mínimo.

n - número de cortes mínimos.

As expressões 4.13 são não-lineares em termos dos parâmetros dos componentes. Além disso as distribuições de probabilidade seguidas pela indisponibilidade total e frequência de falhas são desconhecidas.

Representação das incertezas nos cortes mínimos

Com a finalidade de modelar as incertezas relacionadas com as expressões acima, seja uma variável aleatória Y , tal que $Y = h(X)$, onde X é uma outra variável aleatória, e h a função que relaciona as variáveis X e Y . Se a distribuição de probabilidades de X for conhecida, não é necessário obter a distribuição seguida por Y para calcular $E(Y)$ e $V(Y)$, respectivamente valor esperado (média) e variância da variável aleatória Y [42]. O raciocínio pode ser estendido para uma variável aleatória que seja função de outras duas variáveis aleatórias: $W = h(X, Y)$.

Analisa-se agora o caso da variável aleatória função de outras duas variáveis aleatórias citado acima. Se a função h apresentar complexidade o cálculo de seu valor esperado e variância de W poderá apresentar integrais ou somas de igual complexidade. Podem ser usadas fórmulas aproximadas para solucionar tal problema [42-43]: desenvolve-se a função h em séries de Taylor (nos pontos $X = E\{X\}$ e $Y = E\{Y\}$) e tomam-se alguns termos apenas. Assume-se que as derivadas de h existem no ponto $(E\{X\}, E\{Y\})$, então:

$$E\{W\} \cong h(E\{X\}, E\{Y\}) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial X^2} \right) \sigma^2_X + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial Y^2} \right) \sigma^2_Y$$

$$V\{W\} \cong \left(\frac{\partial h}{\partial X} \right)^2 \sigma^2_X + \left(\frac{\partial h}{\partial Y} \right)^2 \sigma^2_Y$$

O desenvolvimento acima pode ser aplicado ao caso das expressões 4-13. Tanto indisponibilidade total quanto frequência de falha são função da taxa de falha e da taxa de reparo (que são variáveis aleatórias, com variâncias e valores esperados conhecidos). Contudo é necessário efetuar o procedimento a cada corte mínimo do sistema. Somam-se as contribuições de cada corte, e obtém-se o valor esperado e a variância da indisponibilidade total e frequência de falha do sistema.

$$E\{U_f\} = (U_f)_{bv} + \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^n c_{i,u\lambda_j} * \sigma_{\lambda_j}^2 + \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^n c_{i,u\mu_j} * \sigma_{\mu_j}^2 \quad (4.14)$$

$$\text{Var}\{U_f\} = \sum_{i=1}^n b_{i,u\lambda_j}^2 * \sigma_{\lambda_j}^2 + \sum_{i=1}^n b_{i,u\mu_j}^2 * \sigma_{\mu_j}^2 \quad (4.15)$$

$$E\{F_f\} = (F_f)_{bv} + \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^n c_{i,f\lambda_j} * \sigma_{\lambda_j}^2 + \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^n c_{i,f\mu_j} * \sigma_{\mu_j}^2 \quad (4.16)$$

$$\text{Var}\{F_f\} = \sum_{i=1}^n b_{i,f\lambda_j}^2 * \sigma_{\lambda_j}^2 + \sum_{i=1}^n b_{i,f\mu_j}^2 * \sigma_{\mu_j}^2 \quad (4.17)$$

Onde:

- $E\{U_f\}$, $E\{F_f\}$ - valor esperado da indisponibilidade total e da frequência de falha do sistema respectivamente.
- $\text{Var}\{U_f\}$, $\text{Var}\{F_f\}$ - variância da indisponibilidade total e da frequência de falha do sistema respectivamente.
- $(U_f)_{bv}$, $(F_f)_{bv}$ - valor esperado da indisponibilidade total e da frequência de falha do sistema sem a consideração de incertezas nos dados respectivamente (taxa de falha e taxa de reparo sempre iguais aos seus valores esperados).
- $\sigma_{\lambda_j}^2$, $\sigma_{\mu_j}^2$ - variâncias da taxa de falha e da taxa de reparo do componente j , respectivamente.

Os coeficientes c_i e b_i são detalhados no apêndice B. A expressão dos coeficientes deveria ser, tomando como exemplo $c_{i,u\lambda_j}$:

$$c_{i,u\lambda_j} = \left. \frac{\partial^2 (U_f)_i}{\partial \lambda_j^2} \right|_{\lambda_j = E\{\lambda_j\}, \mu_j = E\{\mu_j\}}$$

Assume-se que: $\lambda_j = E\{\lambda_j\}$ e $\mu_j = E\{\mu_j\} \Rightarrow (U_f)_i = (U_f)_{i,bv}$.

Assim, os coeficientes passam a ser.

$$c_{i,u\lambda_j} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j^2}, \quad c_{i,u\mu_j} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \mu_j^2} \quad (4.18)$$

$$c_{i,l\lambda_j} = \frac{\partial^2 (F_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j^2}, \quad c_{i,l\mu_j} = \frac{\partial^2 (F_f)_{ibv}}{\partial \mu_j^2} \quad (4.19)$$

$$b_{i,u\lambda_j} = \frac{\partial (U_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j}, \quad b_{i,u\mu_j} = \frac{\partial (U_f)_{ibv}}{\partial \mu_j} \quad (4.20)$$

$$b_{i,l\lambda_j} = \frac{\partial (F_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j}, \quad b_{i,l\mu_j} = \frac{\partial (F_f)_{ibv}}{\partial \mu_j} \quad (4.21)$$

Onde:

Para cortes de 1a ordem

$$(U_f)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * 8760, \quad (F_f)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * \mu_j \quad (4.22)$$

Para cortes de 2a ordem:

$$(U_f)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * 8760, \quad (4.23)$$

$$(F_f)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * (\mu_j + \mu_k)$$

Para cortes de 3a ordem:

$$(U_f)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * \frac{\lambda_l}{(\lambda_l + \mu_l)} * 8760$$

$$(E_f)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * \frac{\lambda_l}{(\lambda_l + \mu_l)} * (\mu_j + \mu_k + \mu_l)$$
(4.24)

Os coeficientes c_j e b_j são calculados para cada componente (j,k,l) do corte i, sendo multiplicados pelas variâncias das taxas de falha e reparo de cada um, sendo os resultados depois somados.

Por exemplo, seja um sistema qualquer que apresente um determinado corte mínimo i de segunda ordem, englobando os componentes 6 e 7, teríamos então.

$$(U_f)_{ibv} = \frac{\lambda_6}{(\lambda_6 + \mu_6)} * \frac{\lambda_7}{(\lambda_7 + \mu_7)} * 8760$$

$$(E_f)_{ibv} = \frac{\lambda_6}{(\lambda_6 + \mu_6)} * \frac{\lambda_7}{(\lambda_7 + \mu_7)} * (\mu_6 + \mu_7)$$

$$c_{i,u\lambda_6} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \lambda_6^2} \qquad c_{i,u\lambda_7} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \lambda_7^2}$$

$$c_{i,u\mu_6} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \mu_6^2} \qquad c_{i,u\mu_7} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \mu_7^2}$$

A contribuição deste corte ao valor esperado da indisponibilidade total será

$$E\{U_f\}_i = (U_f)_{ibv} + \frac{1}{2} * c_{i,u\lambda_6} * \sigma_{\lambda_6}^2 + \frac{1}{2} * c_{i,u\lambda_7} * \sigma_{\lambda_7}^2 + \frac{1}{2} * c_{i,u\mu_6} * \sigma_{\mu_6}^2 + \frac{1}{2} * c_{i,u\mu_7} * \sigma_{\mu_7}^2$$

Raciocínio semelhante pode ser feito para a frequência de falha e para as variâncias.

Cálculo do intervalo de confiança através da Desigualdade de Chebyshev

Tendo calculado valor esperado e variância, tanto da indisponibilidade total quanto da frequência de falha determinam-se os intervalos de confiança aproximados.

Intervalo de confiança, neste contexto, é um intervalo aleatório (intervalo onde ao menos um dos pontos finais é uma variável aleatória), que abrange o verdadeiro valor do parâmetro, com um nível de confiança especificado $(1 - \gamma)$ [43].

Neste trabalho, porém, há interesse no intervalo de confiança bilateral, que pode ser apresentado através de um exemplo.

Seja $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ uma amostra aleatória de um parâmetro com uma pdf $f(x)$. Seja $T_1 = t_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ e $T_2 = t_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, duas estatísticas tais que:

$$T_1 < T_2 \text{ para todo } x, \quad \text{e} \quad P(T_1 \leq x \leq T_2) = (1 - \gamma)$$

Os valores T_1 e T_2 são chamados limites de confiança inferior e superior respectivamente com nível de confiança $1 - \gamma$, e $[T_1, T_2]$ é o intervalo de confiança bilateral para x , ou seja:

$$P(x > T_2) = \gamma/2 \quad \text{e} \quad P(x < T_1) = \gamma/2$$

Normalmente, para determinação de intervalos de confiança é necessário que a distribuição de probabilidades da variável aleatória de interesse seja conhecida. No caso dos índices de confiabilidade isso nem sempre é possível. No entanto, a Desigualdade de Chebyshev permite a determinação de intervalos de confiança para uma variável aleatória, sem haver a necessidade de conhecer sua distribuição de probabilidades. É preciso apenas que o valor esperado e variância da variável estejam disponíveis.

Tal como definida em [30-31] e [41] a expressão da Desigualdade de Chebyshev é:

$$P\{E\{x\} - k*\sigma < x < E\{x\} + k*\sigma\} \geq 1 - \frac{1}{k^2} \quad (4.25)$$

Onde:

$E\{x\}$ é o valor esperado da variável aleatória x ;

σ é o desvio-padrão da variável aleatória;

k é o número de desvios-padrão arbitrados.

O método de estimação da probabilidade [31] de um dado desvio da média ocorrer, consiste em fixar k e calcular $1-1/k^2$.

Por exemplo pode-se supor uma variável aleatória com distribuição normal de média zero e variância um. Deseja-se obter a probabilidade do seu valor estar entre $\pm 2\sigma$ (isto é $k=2$):

$$P\{-k*\sigma < x < k*\sigma\} \geq 1 - \frac{1}{k^2}$$

$$P\{-2*\sigma < x < 2*\sigma\} \geq 0.75$$

Assim, há uma probabilidade de no mínimo 75% da variável aleatória x assumir valores entre $\pm 2\sigma$, quando calculados por Desigualdade de Chebyshev.

Conservatividade do intervalo de confiança obtido via Desigualdade de Chebyshev

Com relação ao exemplo anterior, calculando inicialmente através da tabela de áreas delimitadas pela curva normal [35] obtém-se uma probabilidade de 95.54% da variável x assumir valores entre $\pm 2\sigma$, valor este substancialmente maior do que 75%.

A Desigualdade de Chebyshev, como está acima exposta, é vaga (estabelece apenas um valor mínimo para a probabilidade da variável assumir valores em um intervalo) e imprecisa em comparação com outros métodos (desde que a distribuição de probabilidades da variável de interesse seja previamente conhecida). Porém, o uso da Desigualdade de Chebyshev é universal, estendendo-se a toda e qualquer variável aleatória que possua média e variância conhecidas [30].

Neste trabalho está-se interessado na determinação de intervalos de confiança para os índices de confiabilidade, que tenham distribuições de probabilidade desconhecidas.

Invertendo o processo usual de emprego da Desigualdade de Chebyshev: ao invés de fixar o intervalo para obter o nível de confiança, fixa-se o nível de confiança para obter o intervalo (como é usualmente feito em estatística).

Então, faz-se o nível de confiança igual a $1 - 1/k^2$, obtém-se k , e substitui-se k e $E\{x\}$ na equação 4.25, determinando os limites, e por consequência o intervalo de confiança.

Claro que a definição do nível de confiança continua a estabelecer um valor mínimo para a probabilidade da variável aleatória assumir valores dentro do intervalo de confiança. Aqui, porém, isso é benéfico já que assegura que o nível mínimo de confiança será aquele adotado. Uma outra consequência ainda mais importante é o fato de que os níveis adotados normalmente (90%, 95%, etc) redundam em intervalos de $\pm 4\sigma$ (desvios-padrão), contribuindo ainda mais para a segurança, uma vez que em muitas distribuições tais intervalos correspondem a quase 100% de probabilidade. Assim o nível, dito mínimo, de confiança fixado na Desigualdade de Chebyshev conduz a intervalos de confiança reais (que seriam obtidos caso as distribuições das variáveis fossem conhecidas) consideravelmente superiores.

Dois exemplos permitem aferir a conservatividade resultante:

1) Seja uma variável aleatória qualquer, que apresenta uma distribuição normal, com média e desvio-padrão conhecidos. Quer-se determinar os intervalos de confiança através da Desigualdade de Chebyshev para os níveis de confiança de 60, 70, 75, 80, 90 e 95%. Conjuntamente apresentam-se os níveis de confiança denominados reais, obtidos através de consulta a tabelas de áreas delimitadas pela curva normal [35].

Nível de confiança fixado via Chebyshev	Número de desvios padrões arbitrados (k)	Nível de confiança real (tabelas), correspondente a $\pm k \cdot \sigma$
60%	± 1.581	88.60%
70%	± 1.826	93.22%
75%	± 2.000	94.44%
80%	± 2.236	97.47%
90%	± 3.162	99.84%
95%	± 4.472	$\cong 100\%$

Tabela 4.1 - Níveis e intervalos de confiança para uma variável aleatória com distribuição normal.

Por exemplo, para um nível de confiança de 60%, corresponde um intervalo de confiança via Chebyshev de $\pm 1.581 \sigma$. Para este intervalo de confiança, consultando-se tabelas de uma distribuição normal [35], obtém-se um nível de confiança de 88.60%.

2) Supor uma outra variável aleatória que siga uma distribuição Gama, com média ($E\{\}$) de 4.819 e desvio-padrão (σ) de 3.897 (implicando em $\alpha = \sigma^2/E\{\} = 3.317$ e $\beta = E\{\}^2/\sigma^2 = 1.453$) [29]. Quer-se determinar os intervalos de confiança através da Desigualdade de Chebyshev, para os mesmos níveis de confiança fixados no exemplo anterior. Conjuntamente apresenta-se o nível de confiança real obtido através de uma distribuição Chi-quadrada equivalente [35-36], tal como exposta abaixo:

Geralmente tabelas das áreas delimitadas pela função Gama não são disponíveis, faz-se então uma transformação desta para a função de distribuição de probabilidade Chi-quadrada [29], já que esta é um caso particular da Gama com média igual a gl (graus de liberdade) e variância igual a $2gl$, quando $\alpha=2$ e $\beta=gl/2$. Deste modo seja uma variável aleatória $X \cong \text{Gam}(\alpha, \beta)$ e que exista uma transformação linear tal que $Y=kX$. O valor esperado de Y será:

$$E\{Y\} = k \cdot E\{X\} = k \cdot \alpha \cdot \beta$$

Fazendo $k=2/\alpha$: $E\{Y\} = 2 \cdot \beta = gl$ e $Y \cong \chi^2(2 \cdot \beta)$, Y tem uma distribuição Chi-quadrada com 2β graus de liberdade, sempre que $k=2/\alpha$. Os limites de confiança tornam-se:

$$P\{\chi^2_{gl, \gamma/2} \leq Y \leq \chi^2_{gl, 1-\gamma/2}\} = 1 - \gamma$$

$$P\{\chi^2_{gl, \gamma/2} \leq k \cdot X \leq \chi^2_{gl, 1-\gamma/2}\} = 1 - \gamma$$

Para $k=2/\alpha$,

$$P\{\frac{\alpha}{2} \cdot \chi^2_{gl, \gamma/2} \leq Y \leq \frac{\alpha}{2} \cdot \chi^2_{gl, 1-\gamma/2}\} = 1 - \gamma$$

Assim, os limites superior e inferior de confiança ficam determinados por:

$$X_{\text{inf}} = \frac{\alpha}{2} \cdot \chi^2_{gl, \frac{\gamma}{2}} \quad \text{e} \quad X_{\text{sup}} = \frac{\alpha}{2} \cdot \chi^2_{gl, 1-\frac{\gamma}{2}} \quad \text{com } gl = 2 \cdot \beta$$

Os valores dos limites superior e inferior de confiança via Chebyshev serão $\mu + k\sigma$ e $\mu - k\sigma$ respectivamente. Devido à assimetria da distribuição Chi-quadrada, o limite inferior calculado por Chebyshev pode ter valor negativo, o que não é real para índices de confiabilidade. Então, nesses casos o limite inferior será considerado igual a zero, o que não é muito grave visto que o interesse principal concentra-se no limite superior dos índices

analisados. Após serem obtidos os limites via Chebyshev, estes são substituídos nas expressões para distribuição Chi-quadrada, obtém-se os percentis e através de tabelas de áreas delimitadas pela função Chi-quadrada [35-36] chega-se aos valores reais de $\gamma/2$ e $1-\gamma/2$, ou seja o nível de confiança real. Para o exemplo em questão, lembrando que a média vale 4.819 e o desvio-padrão 3.897 ($\alpha=3.317$ e $\beta=1.453$ e $g\leq 3$):

Nível de confiança fixado	Intervalo de confiança via Chebyshev	X inf (adotado)	Xsup	Nível de confiança real (tabelas [35-36])
60%	± 1.581	0.0	10.981	92.3%
70%	± 1.826	0.0	11.934	94.2%
75%	± 2.000	0.0	12.613	95.3%
80%	± 2.236	0.0	13.533	96.3%
90%	± 3.162	0.0	17.142	97.1%
95%	± 4.472	0.0	22.247	99.7%

Tabela 4.2 - Níveis e intervalos de confiança para uma variável com distribuição Gama, aproximada por Chi-Quadrado equivalente, com nível de incertezas (σ/E) de 80%.

Nos dois exemplos pode-se constatar que o uso da Desigualdade de Chebyshev para a determinação dos intervalos de confiança é um método adequado e conservativo. Sua validade estender-se a qualquer variável aleatória que disponha de média e desvio-padrão, independentemente de sua função densidade de probabilidade ser conhecida.

Não obstante o exemplo 2 ser expressivo, o alto coeficiente de variação (σ/μ), de cerca de 80% poderia ser o responsável pelos resultados. Para dirimir eventuais dúvidas apresenta-se o mesmo exemplo, com a mesma média e supondo ainda obediência a uma distribuição Gama, com coeficientes de variação de 30% e 15%.

Nível de confiança fixado	Intervalo de confiança via Chebyshev	X inf (adotado)	Xsup	Nível de confiança real (tabelas [35-36])
60%	± 1.581	2.533	7.105	89.3%
70%	± 1.826	2.179	7.459	93.9%
75%	± 2.000	1.927	7.711	95.8%
80%	± 2.236	1.586	8.052	97.2%
90%	± 3.162	0.246	9.392	99.5%
95%	± 4.472	0.0	11.286	$\geq 100\%$

Tabela 4.3 - Níveis e intervalos de confiança para uma variável com distribuição Gama, aproximada por Chi-Quadrado equivalente, com nível de incertezas de 30%.

Nível de confiança fixado	Intervalo de confiança via Chebyshev	X inf (adotado)	Xsup	Nível de confiança real (tabelas [35-36])
60%	± 1.581	3.676	5.962	88.1%
70%	± 1.826	3.499	6.139	93.0%
75%	± 2.000	3.373	6.265	95.0%
80%	± 2.236	3.202	6.436	97.1%
90%	± 3.162	2.533	7.105	99.2%
95%	± 4.472	1.586	8.052	$\geq 100\%$

Tabela 4.4 - Níveis e intervalos de confiança para uma variável com distribuição Gama, aproximada por Chi-Quadrado equivalente, com média= 4.819 e desvio-padrão=0.723 (coeficiente de variação de 15%, $\alpha=0.108$, $\beta=44.426$ e 90 graus de liberdade)

Observe-se que uma distribuição χ^2 com graus de liberdade superiores a trinta, pode ser aproximada por uma normal [37] com média zero e variância.

Em todos os casos observou-se que uma vez fixados os níveis de confiança os resultados para uma variável que obedeça à distribuição Gama, com diferentes coeficientes de variação, apresentam-se conservativos com a utilização da Desigualdade de Chebyshev para determinação dos limites de confiança.

As figuras 4.3 e 4.4 permitem aferir a amplitude dos intervalos para os coeficientes de variação de 80, 30 e 15%, para níveis de confiança de 60e 90% respectivamente

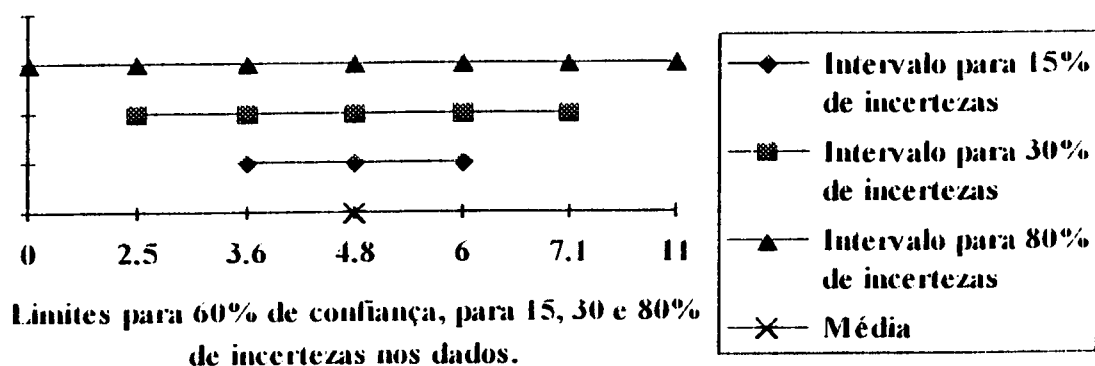


Figura 4.3- Limites para 60% de confiança, para vários níveis de incertezas.

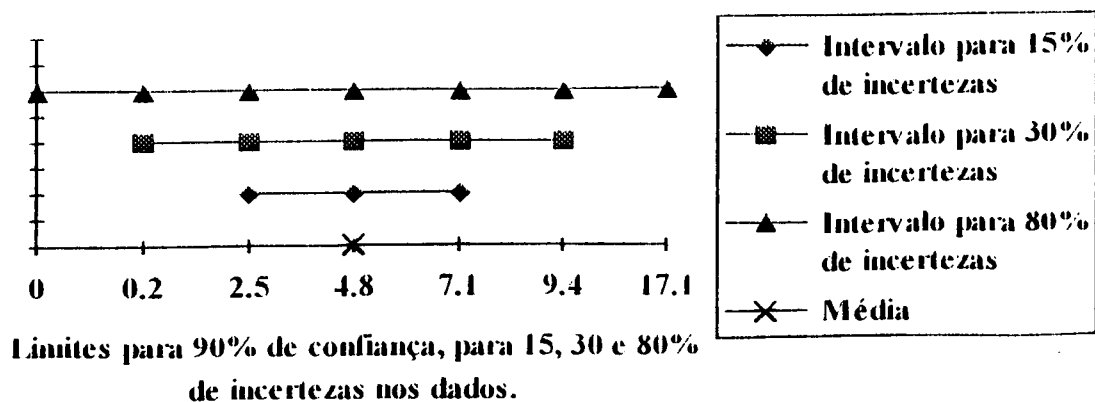


Figura 4.4- Limites para 90% de confiança, para vários níveis de incertezas

Portanto, a metodologia de González-Urdaneta & Cory além da consideração de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo, do cálculo de frequência e probabilidade de falha, ainda apresenta a vantagem de chegar a resultados conservativos para os intervalos de confiança desses índices.

4.4- CONCLUSÕES

Após a análise das duas opções disponíveis, optou-se pelo método analítico de González-Urdaneta e Cory [19]. Tal técnica será usada em conjunto com a metodologia CST para o cálculo da confiabilidade de sistemas de distribuição e transmissão.

Uma questão que muito contribuiu na escolha foi a possibilidade de considerar as incertezas dos dados como informações de entrada. Isso é feito mediante a especificação das variâncias das taxas de falha e reparo dos componentes (como pode ser visto nas equações 4.15 a 4.18). Outras técnicas reconhecem a existência de incertezas nos dados (tanto que as refletem nos índices mediante cálculo de variância), mas não usam como entrada a variância das taxas de falha e reparo, apenas assumem que os índices seguem uma determinada distribuição.

As hipóteses usadas pela metodologia adotada são semelhantes as do CST, possibilitando uma conjunção mais fácil entre as duas técnicas.

Um dos principais atributos da metodologia CST é a determinação dos cortes mínimos, que é uma técnica versátil e fácil de ser manipulada em computador digital. Como a técnica da referência [19] também utiliza os cortes mínimos como ferramenta básica para o cálculo dos índices, nada mais lógico do que pensar em conjugar as metodologias.

Uma metodologia de tratamento de incertezas nos dados deve refleti-las em todos os índices calculados. Em [19] isso realmente ocorre, uma vez que são calculadas variâncias tanto para a frequência quanto para a probabilidade de falha.

Possivelmente, porém, a mais interessante das características da técnica de González-Urdaneta e Cory seja a obtenção dos intervalos de confiança. A forma como a Desigualdade de Chebyshev é utilizada garante uma flexibilidade considerável à metodologia: não exige, para a determinação dos limites de confiança, que os índices de confiabilidade sigam uma determinada distribuição de probabilidade. Como se não bastasse, os resultados obtidos são conservativos: apresentam valores reais de confiança (calculados usando a distribuição de probabilidade seguida pelo índice) maiores do que os fixados no cálculo.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA CSTDI- CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO INCERTEZAS NOS DADOS

5.1- INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentar-se-á a metodologia CSTDI (Confiabilidade de Sistemas de Transmissão e Distribuição considerando Incertezas nos dados): junção das metodologias CST (Confiabilidade de Sistemas de Transmissão [11]), que pode ser usada também em sistemas de distribuição, com a técnica analítica de González-Urdaneta e Cory [19] de tratamento de incertezas nos dados (doravante chamada neste trabalho de GU&C). Além das necessárias adaptações para a união das duas metodologias, modificações foram feitas para permitir a aplicação da técnica a sistemas de distribuição (normalmente radiais, ou radiais com recurso de chaveamento).

O resultado final é uma metodologia que pode ser aplicada a sistemas de transmissão e distribuição, avaliando sua confiabilidade através do cálculo de índices para os diversos pontos de carga e para o sistema como um todo. A determinação dos modos de falhas é feita mediante a técnica de cortes mínimos, usando o critério de perda total de continuidade, e fazendo distinção entre sistemas de transmissão e distribuição. São calculados os valores esperados e variâncias das frequências de falha e indisponibilidades totais, permitindo a determinação de intervalos de confiança para os índices mediante o uso da Desigualdade de Chebyshev.

5.2- INCLUSÃO DAS INCERTEZAS DOS VÁRIOS MODOS DE FALHA

Conforme visto no Capítulo 4, a metodologia GU&C considera apenas um modo de falha. Isto é, admite que somente as falhas denominadas passivas (falhas permanentes) venham a interromper os caminhos possíveis entre fonte(s) e carga(s). As falhas passivas somente podem ser sanadas mediante o reparo dos componentes que as sofreram.

Já a metodologia CST, como mostrada no Capítulo 3, considera vários modos de falha, proporcionando um maior realismo à modelagem do sistema e resultados mais representativos. Além das falhas passivas são consideradas a influência da manutenção programada, as falhas ativas, as falhas que podem ser sanadas por chaveamento de elementos N.A. (temporárias), e situações em que disjuntores não operam quando chamados. Tornou-se necessário então um estudo para concatenar as duas metodologias.

Algumas considerações precisam ser feitas para estender o uso dos coeficientes c_j e b_j a todos os modos de falha. Observe-se que estes coeficientes são obtidos pela derivação das expressões de frequência de falha e indisponibilidade total (equações 4.18 a 4.21) sem incertezas, em relação às taxas de falha ou reparo dos componentes. Esses valores de frequência de falha e indisponibilidade total sem consideração de incertezas são calculados pelo método dos cortes mínimos.

5.2.1- Novos coeficientes

Em muitos modos de falha os coeficientes do Apêndice B poderão ser usados sem outra alteração além da substituição das taxas de falha passiva por aquelas de cada modo. Os modos em que os coeficientes podem ser usados sem alteração são:

- falha passiva (primeira e segunda ordens);
- falha ativa de um componente;

- falha ativa de um componente estando outro em falha passiva (isolado para reparo) ou em manutenção programada simultaneamente;
- falha ativa de um componente estando simultaneamente um disjuntor preso (multiplicando-se os coeficientes pela probabilidade de disjuntor preso);
- falha temporária de um componente;
- falha temporária de um componente estando outro em falha passiva ou em manutenção programada.

No caso de falha passiva com outro componente em manutenção programada, e indisponibilidade total devido a falhas temporárias, outros coeficientes terão que ser deduzidos, para que a metodologia de tratamento de incertezas possa ser aplicada corretamente a estes modos de falha

As expressões de frequência de falha e indisponibilidade total com incertezas para cortes de primeira e segunda ordem são mostradas a seguir. Não obstante a técnica lidar com contingências de até terceira ordem, enumeram-se apenas as de primeira e segunda ordem, pelo fato de que são estas as de maior impacto sobre os índices de confiabilidade.

Para os cortes de 1ª Ordem tem-se que:

$$U_{f_{bv}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} * 8760, \quad F_{f_{bv}} = \frac{\lambda * \mu}{\lambda + \mu} \quad (5.1)$$

Se $\mu \gg \lambda$,

$$U_{f_{bv}} \cong \frac{\lambda}{\mu} * 8760, \quad F_{f_{bv}} \cong \lambda \quad (5.2)$$

Para cortes de 2a Ordem:

$$U_{f_{bv}} = \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760 \quad F_{f_{bv}} = \frac{\lambda_i * \lambda_j * (\mu_i + \mu_j)}{(\lambda_i + \mu_i) * (\lambda_j + \mu_j)} \quad (5.3)$$

Se $\mu_i \gg \lambda_i$ e $\mu_j \gg \lambda_j$:

$$U_{f_{bv}} \cong \frac{\lambda_i * \lambda_j}{\mu_i * \mu_j} * 8760 \quad F_{f_{bv}} \cong \frac{\lambda_i * \lambda_j * (\mu_i + \mu_j)}{\mu_i * \mu_j} \quad (5.4)$$

Os coeficientes b e c são necessários para a utilização das equações 4.14 a 4.17, que determinam os valores esperados e variâncias de frequência de falha e indisponibilidade total, e são relacionados com as expressões acima.

Para facilitar a compreensão, as equações dos coeficientes são rerepresentadas abaixo:

$$c_{i,u\lambda_j} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j^2} \quad c_{i,u\mu_j} = \frac{\partial^2 (U_f)_{ibv}}{\partial \mu_j^2} \quad (5.5)$$

$$c_{i,f\lambda_j} = \frac{\partial^2 (F_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j^2} \quad c_{i,f\mu_j} = \frac{\partial^2 (F_f)_{ibv}}{\partial \mu_j^2} \quad (5.6)$$

$$b_{i,u\lambda_j} = \frac{\partial (U_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j} \quad b_{i,u\mu_j} = \frac{\partial (U_f)_{ibv}}{\partial \mu_j} \quad (5.7)$$

$$b_{i,f\lambda_j} = \frac{\partial (F_f)_{ibv}}{\partial \lambda_j} \quad b_{i,f\mu_j} = \frac{\partial (F_f)_{ibv}}{\partial \mu_j} \quad (5.8)$$

Onde o índice b_v indica o valor calculado inicialmente sem incertezas.

Apresentar-se-á a seguir os novos coeficientes para falha passiva quando um outro componente está em manutenção programada, e para indisponibilidade total devido a falhas temporárias. Os demais modos de falha utilizam as mesmas expressões para c_i e b_i já apresentadas no Capítulo 4

5.2.1.1- Falha passiva de um componente i estando outro componente j em manutenção programada.

As considerações feitas neste modo de falha, são as mesmas da seção 3.2.2.6, ou seja a não realização de manutenção programada quando já houverem componentes falhados no sistema e, terminar a manutenção programada já iniciada, não obstante ocorram novas falhas. Lembrar também que os eventos $i-j$ e $j-i$ são distintos.

Sejam:

- λ_i e λ_j taxas de manutenção programada dos componentes i e j .
- μ_i e μ_j taxas de reparo referentes à manutenção programada dos componentes i e j .

$$P_{i_{bv}} = \frac{\lambda_i * \lambda_j * \mu_i + \lambda_i * \lambda_j * \mu_j}{\mu_i * \mu_j} \quad (5.9)$$

$$U_{i_{bv}} = \frac{\lambda_i * \lambda_j}{\mu_j * (\mu_i + \mu_j)} + \frac{\lambda_i * \lambda_j}{\mu_i * (\mu_i + \mu_j)} \quad *8760$$

Neste caso estas expressões são substancialmente diferentes de 5.3 e 5.4, portanto novos coeficientes serão deduzidos.

Evento: i sofre falha passiva, estando j em manutenção programada.

Em relação à indisponibilidade total:

$$b_{2,u\lambda_i} = \frac{\lambda_j^n}{\mu_j^n * (\mu_i + \mu_j^n)} * 8760 \quad b_{2,p\lambda_j} = \frac{\lambda_i}{\mu_j^n * (\mu_i + \mu_j^n)} * 8760 \quad (5.10)$$

$$b_{2,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i * \lambda_j^n}{\mu_j^n * (\mu_i + \mu_j^n)^2} * 8760 \quad b_{2,u\mu_j} = \frac{-\lambda_i * \lambda_j^n * (2 * \mu_j^n + \mu_i)}{[\mu_j^n * (\mu_i + \mu_j^n)]^2} * 8760 \quad (5.11)$$

$$c_{2,u\lambda_i} = 0 \quad c_{2,u\lambda_j} = 0 \quad (5.12)$$

$$c_{2,u\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda_j^n}{\mu_j^n * (\mu_i + \mu_j^n)^3} * 8760 \quad (5.13)$$

$$c_{2,u\mu_j} = \frac{\lambda_i * \lambda_j^n * \{ (2 * \mu_j^n + \mu_i) * [2 * (\mu_i + \mu_j^n) + 2 * \mu_j^n] - 2 * \mu_j^n * (\mu_i + \mu_j^n) \}}{\mu_j^n^3 * (\mu_i + \mu_j^n)^3} * 8760 \quad (5.14)$$

Em relação a frequência de falha:

$$b_{2,f\lambda_i} = \frac{\lambda_j^n}{\mu_j^n} \quad b_{2,f\lambda_j} = \frac{\lambda_i}{\mu_j^n} \quad (5.15)$$

$$b_{2,f\mu_i} = 0 \quad b_{2,f\mu_j} = \frac{-\lambda_j^n \lambda_i}{(\mu_j^n)^2} \quad (5.16)$$

$$c_{2,f\lambda_i} = 0, \quad c_{2,f\lambda''_j} = 0 \quad (5.17)$$

$$c_{2,f\mu_i} = 0, \quad c_{2,f\mu''_j} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda''_j}{(\mu''_j)^3} \quad (5.18)$$

Evento: j sofre falha passiva, estando i em manutenção programada.

Análogo às fórmulas de 5.10 a 5.18, trocando-se i por j e j por i'', ou seja: taxas de falha e reparo referentes à falha passiva de i por suas equivalentes de j, e taxas de falha e reparo referentes à manutenção programada de j por suas equivalentes de i.

5.2.1.2- Falha temporária de um componente (sanada por chaveamento de elementos normalmente abertos).

Sejam:

- t_c o tempo de chaveamento.
- μ_c a taxa de reparo referente ao chaveamento, onde $\mu_c = 8760/t_c$

$$F_{fbv} = \lambda_i \quad U_{fbv} = \frac{\lambda_i}{\mu_c} * 8760. \quad (5.19)$$

A fórmula de frequência coincide com a das equações 5.2, mas a de indisponibilidade apresenta discrepância (μ_c), devido à taxa de reparo ser substituída pelo tempo de chaveamento. Esta taxa de reparo, visto que o tempo de chaveamento geralmente é bem menor do que os tempos de reparo, será consideravelmente maior do que aquela das equações 5.2.

Assim:

$$b_{1,u\lambda_i} = \frac{1}{\mu_c} * 8760 \quad b_{1,u\mu_i} = 0. \quad (5.20)$$

$$c_{1,u\lambda_i} = 0 \quad c_{1,u\mu_i} = 0 \quad (5.21)$$

Os coeficientes relativos a frequência não sofrem alterações em relação aos do Apêndice B.

5.2.1.3- Falha temporária de um componente i estando outro componente j em falha passiva.

$$I_{i_{bv}}^c = \frac{\lambda_i * \lambda_j * (\mu_i + \mu_j)}{\mu_i * \mu_j} \quad U_{i_{bv}}^c = \frac{\lambda_i * \lambda_j * (\mu_i + \mu_j)}{\mu_i * \mu_j * \mu_c} * 8760 \quad (5.22)$$

Considerações semelhantes às da seção anterior podem ser feitas, em relação as equações 5.4. Também neste modo de falha os coeficientes referentes à frequência de falha podem ser usados sem modificações.

$$b_{2,u\lambda_i} = \frac{\lambda_j * (\mu_i + \mu_j)}{\mu_i * \mu_j * \mu_c} * 8760 \quad b_{2,u\lambda_j} = \frac{\lambda_i * (\mu_i + \mu_j)}{\mu_i * \mu_j * \mu_c} * 8760 \quad (5.23)$$

$$b_{2,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i * \lambda_j}{\mu_i^2 * \mu_c} * 8760 \quad b_{2,u\mu_j} = \frac{-\lambda_i * \lambda_j}{\mu_j^2 * \mu_c} * 8760 \quad (5.24)$$

$$c_{2,u\lambda_i} = 0 \quad c_{2,u\lambda_j} = 0 \quad (5.25)$$

$$c_{2,u\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda_j}{\mu_i^3 * \mu_c} * 8760 \quad c_{2,u\mu_j} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda_j}{\mu_j^3 * \mu_c} * 8760 \quad (5.26)$$

5.2.1.4- Falha temporária de um componente i estando outro componente j em manutenção programada.

$$I_{i_{bv}}^c = \frac{\lambda_i * \lambda_j'' * (\mu_i + \mu_j'')}{\mu_i * \mu_j''} \quad U_{i_{bv}}^c = \frac{\lambda_i * \lambda_j'' * (\mu_i + \mu_j'')}{\mu_i * \mu_j'' * \mu_c} * 8760 \quad (5.27)$$

Podem ser feitas considerações semelhantes as das duas seções anteriores, trocando apenas j por j''

Os coeficientes relativos à frequência de falha não sofrem alterações em relação aos apresentados no Apêndice B.

Os novos coeficientes, completos e com a notação adequada para os vários modos de falha estão no Apêndice C.

5.3- METODOLOGIA CSTDI

O agregamento da metodologia de incertezas à técnica de cortes mínimos com vários modos de falha exige algumas considerações, pois em [19] era considerado apenas um modo de falha e um ponto de carga. Em sua maioria são considerações de natureza estatística, sobre independência de variáveis aleatórias, componentes e cortes mínimos, de modo a totalizar corretamente os valores esperados e variâncias dos índices de confiabilidade para cada modo de falha e ponto de carga.

5.3.1- Identificação dos cortes.

A metodologia empregada inicialmente identifica as falhas passivas: cortes mínimos de primeira e segunda ordem que interrompem o fornecimento e exigem reparo dos componentes falhados. Em seguida identifica os cortes por falha ativa (que envolvem a atuação da proteção). O corte que já foi identificado como falha passiva não será novamente como falha ativa. Posteriormente verifica-se a possibilidade de existência de falhas temporárias que possam ser sanadas por chaveamento de elementos N.A., e, finalmente, são consideradas as falhas ativas de primeira ordem conjugadas a disjuntor preso.

A influência da manutenção programada é considerada nos modos de falha passiva, ativa e temporária. Nas contingências de segunda ordem, em que pelo menos um dos componentes tenha taxa de manutenção programada, calcula-se a contribuição do caso falha de um

componente estando outro em manutenção programada, juntamente com a da contingência de segunda ordem.

Posteriormente somam-se os resultados para cada ponto de carga, e montam-se os cortes para o sistema (somente falhas passivas), eliminando os cortes comuns a vários pontos (admitindo que a interrupção do fornecimento a qualquer ponto de carga é um estado de falha do sistema).

5.3.2- Considerações sobre independência de cortes.

Dois eventos são estatisticamente independentes se a ocorrência de um evento não influencia a ocorrência ou não ocorrência do outro ([33]).

Todos os cortes mínimos são mutuamente exclusivos entre si, ou seja a ocorrência de um implica na não ocorrência de todos os outros (não é possível a ocorrência simultânea de dois cortes mínimos), uma vez que ocorrendo qualquer interrupção do fornecimento sana-se a falha antes de recolocar o sistema em operação. Assim o conjunto dos cortes mínimos é uma sequência de eventos disjuntos. Sabendo que para uma sequência de cortes disjuntos [33]:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n \text{Corte}_i\right) = \sum_{i=1}^n P(\text{Corte}_i) \quad (5.28)$$

Onde:

n- número de cortes mínimos.

$P\{ \}$ - probabilidade de ocorrência.

Corte_i - corte mínimo i .

Para o caso das variâncias a consideração de independência entre os cortes mínimos passa a ser mais importante. Se e somente se os cortes mínimos forem independentes a expressão abaixo é válida:

$$\text{Var}\left(\bigcup_{i=1}^n \text{Corte}_i\right) = \sum_{i=1}^n \text{Var}(\text{Corte}_i) \quad (5.29)$$

Onde:

Var()- variância

Intuitivamente observa-se que para todo modo de falha cada corte mínimo é independente do outro (além de mutuamente exclusivo), ou seja o fato de um corte ocorrer, não têm influência na ocorrência de outro.

O raciocínio acima é válido inclusive para os cortes que envolvam manutenção programada. A existência de um corte de segunda ordem envolvendo os componentes i e j , não implica que deverá haver outro corte de segunda ordem envolvendo os mesmos componentes, onde um dos elementos (ou i ou j) está em manutenção. A metodologia porém, ao identificar um corte de segunda ordem, identifica também um corte de segunda ordem envolvendo manutenção (caso o tempo necessário para a manutenção do componente seja significativo).

Quando se analisam cortes mínimos de modos de falha diferentes, a consideração de independência também pode ser feita. A ocorrência de um corte em determinado modo de falha não influenciará a ocorrência de outro corte em um modo de falha diferente. E se o corte for identificado em um determinado modo de falha não será considerado nos modos posteriores, para evitar que o mesmo corte seja contabilizado duas vezes.

Com base nos parágrafos anteriores, pode-se concluir que os valores esperados e as variâncias da frequência de falha e da indisponibilidade total são compostos pela união das contribuições de todos os cortes mínimos.

5.4- APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.

A metodologia CST foi desenvolvida para uso em sistemas de transmissão e subestações. Sua grande flexibilidade porém, permite o seu aproveitamento para análise de sistemas de distribuição [15], sem maiores problemas. Contudo, em virtude da filosofia originalmente adotada, algumas adaptações são necessárias para a aplicação em sistemas de distribuição que são geralmente radiais ou radiais com recurso.

Em um sistema de transmissão ou subestação típicos geralmente há vários pontos fonte, bem como um considerável número de malhas, possibilitando uma maior quantidade de caminhos possíveis entre as fontes e cada ponto de carga. Em termos práticos pode-se dizer que existe a possibilidade de um mesmo componente ser alimentado por ambas as extremidades, se for bidirecional. Observe-se a figura a seguir.

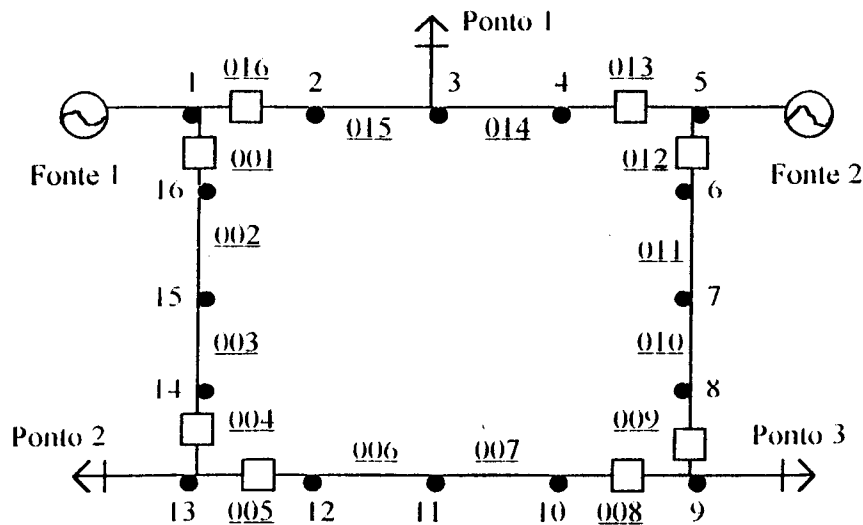


Figura 5.1- Sistema de transmissão em anel.

Supondo que todos os ramos (001 a 016) tenham a mesma capacidade, intuitivamente conclui-se que existe a possibilidade, por exemplo, do ramo 003 ser alimentado por uma das fontes no sentido dos nós 15-14 ou 14-15. O Ponto 1 pode ser alimentado pelo seguintes caminhos :

a partir de Fonte 1: 016, 015;

001, 002, 003, 004, 005, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 012, 013, 014.

a partir de Fonte 2: 013, 014;

012, 011, 010, 009, 008, 007, 006, 005, 004, 003, 002, 001, 016, 015.

Raciocínio semelhante pode ser feito para os outros dois pontos de carga.

O importante a observar é que o sentido do caminho através dos ramos pode inverter-se, e portanto também do fluxo de carga. Isso implica que no caso de análise da atuação da proteção podem atuar os disjuntores, tanto de um lado quanto do outro do ramo.

No exemplo acima, no caso de falha ativa do ramo 003, podem atuar os disjuntores 001 e 004. Assim, a metodologia CST tal como inicialmente concebida não identifica qual o disjuntor que atua para isolar a falha em cada caminho fonte-carga.

Em sistemas de distribuição tipicamente radiais, a situação muda consideravelmente.

Em primeiro lugar o número de pontos fonte é menor, e devido às topologias freqüentemente empregadas, o número de caminhos possíveis fonte-carga também se reduz substancialmente. Como consequência muitos dos componentes do sistema (mesmo que sejam bidirecionais) são alimentados apenas por um lado. Assim, somente os disjuntores a montante do ramo é que podem atuar como sua proteção. O exemplo abaixo ilustra essa situação:

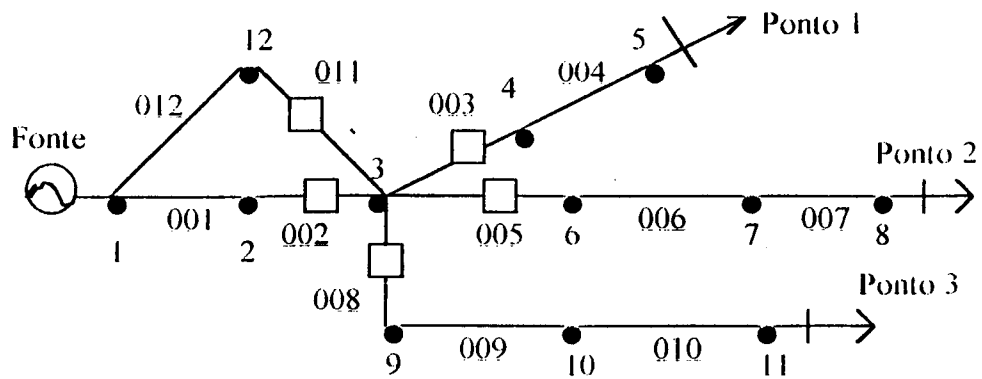


Figura 5.2- Sistema de distribuição radial.

Na figura 5.2, por exemplo, a falha ativa em 005 deve ser isolada pelo disjuntor 002 ou 011 causando interrupção no fornecimento à Carga 1.

Em sua forma original a metodologia CST chegaria a um resultado diferente.

Pelo algoritmo original a matriz de atuação da proteção do ramo 005 será composta pelos ramos (disjuntores mais próximos) 002, 011, 008 e 003.

Ao analisar se a falha ativa de um componente interrompe o fornecimento a um ponto de carga a metodologia CST atua da seguinte forma: busca se um dos disjuntores mais próximos do componente falhado, ou o próprio componente, interrompem o caminho entre fonte e carga. Caso isto aconteça a falha ativa do componente constitui um corte mínimo.

Os caminhos entre fonte e carga são montados do ponto de carga para o(s) ponto(s) fonte, podendo acarretar na identificação de um disjuntor que não esteja em posição adequada para isolar a falha ativa no componente.

Assim para o exemplo citado, falha ativa em 005, a metodologia identificaria que há interrupção no fornecimento ao Ponto 1 devido à atuação do disjuntor 003, embora o

disjuntor 003 não esteja posicionado à montante do componente 005, ou seja não identificaria os disjuntores 002 e 011 como responsáveis pela interrupção do fornecimento.

Um outro problema surge quando o componente não possui nenhum disjuntor à montante, mas dispõe de alguns a jusante. O algoritmo identificará interrupção no fornecimento aos pontos de carga pela atuação desses disjuntores a jusante do componente, quando deveria identificar a interrupção pela atuação de uma proteção existente na subestação.

Parece claro, então, que é necessário um algoritmo de identificação de cortes por atuação da proteção adaptado para sistemas de distribuição tal como se apresentam, em esmagadora maioria no Brasil (radiais, ou radiais com recurso). Concebeu-se então uma chave de escolha: estudos de transmissão (usando a identificação dos cortes por atuação da proteção tal como originalmente proposto para sistemas de transmissão ou de distribuição malhados) e estudos de distribuição (com o novo algoritmo de identificação direcionado para sistemas radiais de distribuição). Assim, o algoritmo permite estudos de proteção.

5.5- CONTRIBUIÇÕES AO ALGORITMO

Modificações foram feitas no algoritmo CST, de modo a incorporar o tratamento de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo dos componentes, e as adaptações para uso em sistemas de distribuição radiais.

A seguir serão apresentadas as características gerais de cada módulo acrescentado, bem como das alterações necessárias para sua implementação.

5.5.1- Alterações no módulo principal

Foi inserida no algoritmo uma opção: estudo de sistemas malhados ou radiais. Se estudo de transmissão será usado o módulo original do CST para verificar se há interrupção no fornecimento, e nos estudos de distribuição será usado o módulo CORTED, que será detalhado adiante.

Também é opcional ao usuário, a determinação de intervalos de confiança para os índices de confiabilidade. Para tal, o usuário deverá fornecer o nível de confiança desejado.

5.5.2- Alterações nos módulos de identificação dos modos de falha

Para cada tipo de falha (falhas passivas, falhas ativas, falhas temporárias, falha ativa com disjuntor preso, e falhas do sistema) são calculados o valor esperado, a variância e os limites de confiança dos índices de confiabilidade. Naqueles modos de falha em que está envolvida a atuação da proteção (módulos que calculam falhas ativas, temporárias e falhas com disjuntor preso), em estudos de distribuição, será acionado o módulo CORTED para identificação dos cortes que causam interrupção no fornecimento.

5.5.3- Novos módulos

Ao todo foram incluídas cinco novos módulos no algoritmo. São eles: INCERT, CORTED, COEFIC, BUSCA e PARALEL.

5.5.3.1- Módulo de cálculo das incertezas- INCERT

Neste módulo são calculadas as contribuições das incertezas das taxas de falha e reparo ao valor esperado e variância da indisponibilidade total e frequência de falha, de cada corte mínimo, em cada modo de falha, em cada ponto de carga, e no sistema. Os cortes mínimos e os valores sem a consideração de incertezas ("best-values") vêm dos módulos que identificam e calculam as contribuições dos cortes mínimos por falha passiva, ativa, temporária, ativa conjugada a disjuntor preso e para o sistema. Os coeficientes de cada modo de falha são computados no módulo COEFIC.

As incertezas nas taxas de manutenção programada são geralmente menores do que as das taxas de falha dos componentes. Assim, as incertezas relativas à manutenção programada precisam ser fornecidas separadamente (das incertezas das taxas de falha e de reparo), para uso nos casos das falhas que envolvem manutenção.

5.5.3.2- Módulo de identificação de falhas por atuação da proteção em sistemas de distribuição radiais- CORTED

Caso o estudo envolva distribuição (do tipo sistema radial, ou radial com recurso), quando da execução dos módulos ATIVA, TEMPO e DJPRES (relacionadas com a atuação da proteção) será acionado o módulo CORTED para verificar se o possível corte montado efetivamente interrompe o fornecimento.

Apresenta-se a seguir um diagrama de blocos da subrotina CORTED.

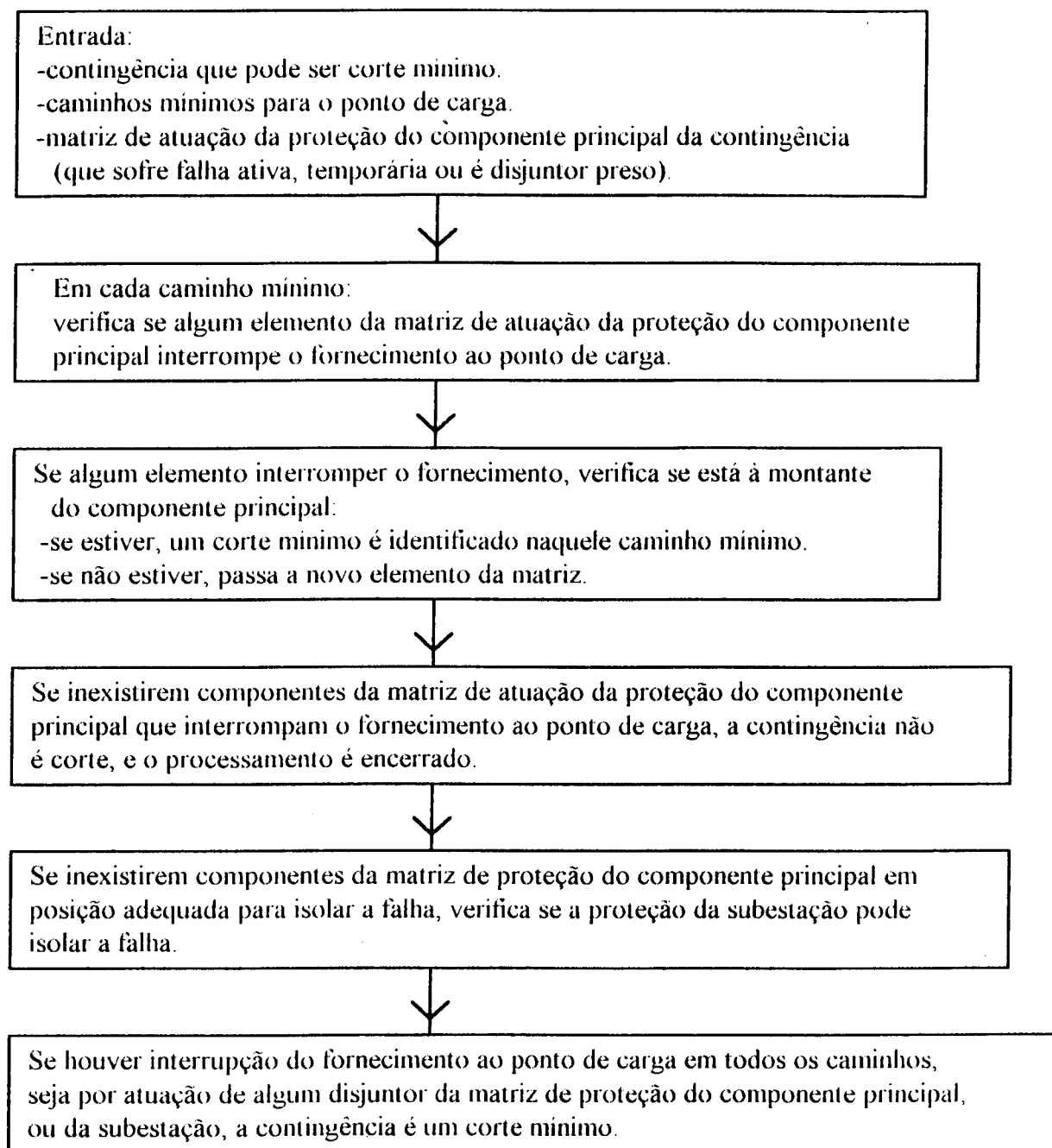


Figura 5.3 - Diagrama de blocos do módulo CORTED

5.5.3.3- Módulos BUSCA e PARALEL

Os módulos BUSCA e PARALEL são importantes ferramentas para a execução de CORTED, e portanto indispensáveis para a determinação dos cortes mínimos que envolvem atuação da proteção em estudos de distribuição.

Apresenta-se a seguir um diagrama de blocos do módulo BUSCA, que inclui PARALEL:

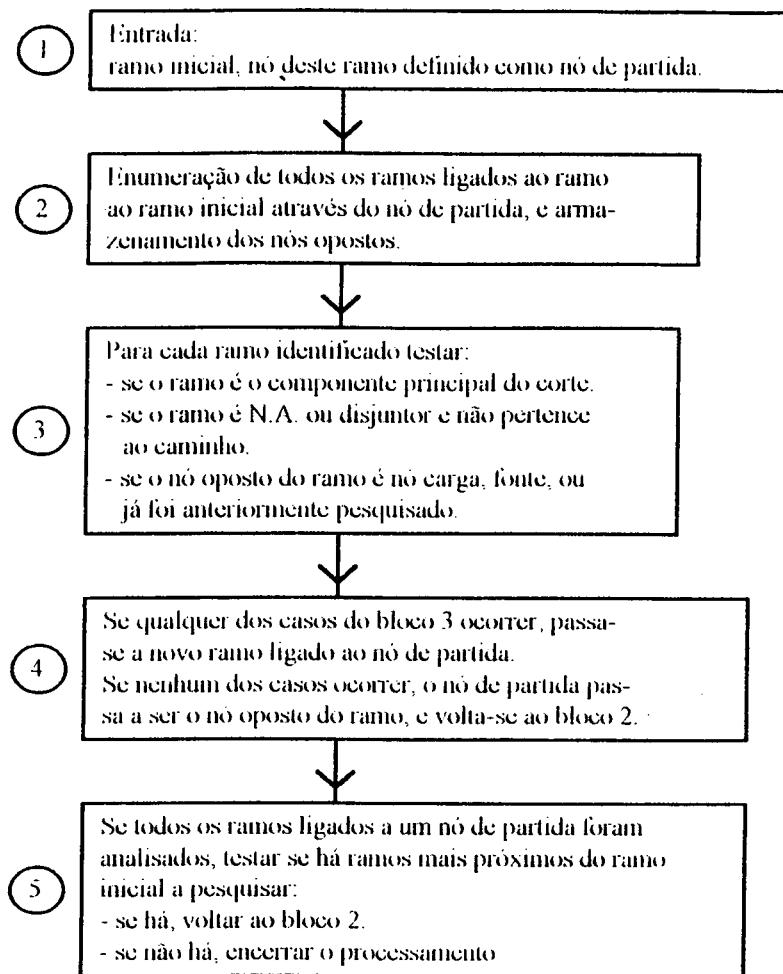


Figura 5.4 - Diagrama de blocos da subrotina BUSCA.

O módulo BUSCA é basicamente um algoritmo de busca em grafos, em que a partir de um nó especificado em CORTED, procura identificar:

- o componente que sofre falha ativa, temporária, ou está preso (exigindo a atuação da proteção de retaguarda).
- pontos de carga, quando então a busca é interrompida.
- ramos que sejam normalmente abertos (N.A.) e não pertençam ao caminho sob análise.
- pontos fonte, quando a busca também é interrompida.
- se nenhum dos casos anteriores ocorrer, e o outro nó do ramo não tiver sido pesquisado ainda, reinicia-se o processo por este nó.

No caso de haver ramos em paralelo, é feita uma filtragem dos ramos ligados a um mesmo nó, através do módulo PARALEL.

O módulo PARALEL escolhe os ramos que serão mantidos para futura análise em BUSCA através dos seguintes critérios:

- verifica quais elementos estão em paralelo
- dos elementos em paralelo, somente um poderá pertencer ao caminho, e este é que será mantido.
- se nenhum dos elementos pertencer ao caminho, escolhe o primeiro dos ramos em paralelo
- se não houverem elementos em paralelo deixa o conjunto de ramos como está.

5.5.3.4- Aplicação em um sistema radial

Apresenta-se a seguir um exemplo para ilustrar o algoritmo. Seja um sistema de distribuição radial, com cinco pontos de carga e apenas um ponto fonte (figura 5.5).

Deseja-se identificar as contingências que constituem cortes mínimos (portanto interrompem o fornecimento) para o Ponto de carga 1 (conectado ao nó 4 do grafo), no modo de falha ativa.

Sejam os caminhos mínimos para o Ponto 1:

Caminho 1- 003, 002, 001, 021, 020, 019.

Caminho 2- 003, 002, 001, 004, 005, 025, 024, 023, 022 (onde o componente 025 é um elemento N.A.).

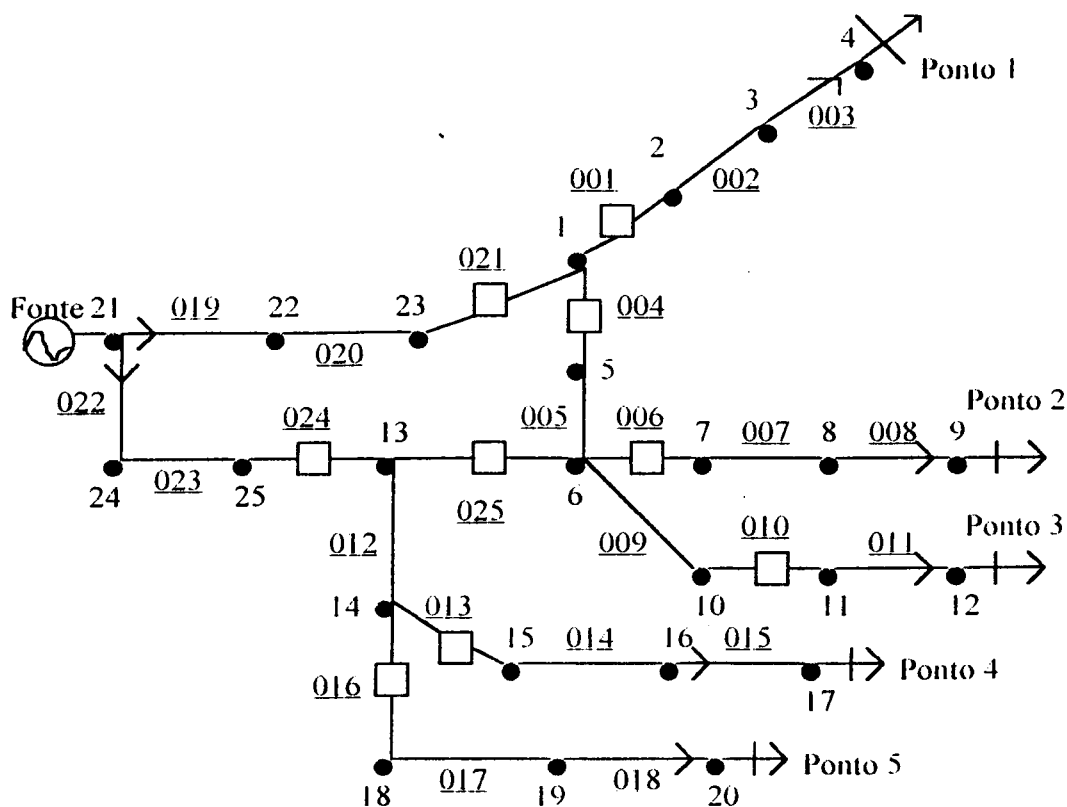


Figura 5.5- Sistema radial exemplo, onde o disjuntor 025 é N.A.

As linhas duplas indicam disjuntores, e linhas duplas perpendiculares indicam elementos N.A.. Os ramos com setas são unidirecionais no sentido indicado pelas setas.

Elege-se o componente 004 como exemplo para a análise. Este disjuntor não constitui corte mínimo no modo falha passiva, e deseja-se saber se é um corte no modo de falha ativa. Para que isso aconteça os elementos da sua matriz de atuação da proteção, ou seja, os disjuntores mais próximos (001, 021, 006, e 025), ou o próprio componente 004, devem interromper o fornecimento ao Ponto 1, em ambos os caminhos.

Percorrendo o caminho 1, a partir do Ponto 1, encontra-se o disjuntor 001, que pertence à matriz de atuação da proteção do componente 004, interrompendo o fornecimento. Não obstante, como o disjuntor 001 não está à montante do componente 004, não está adequadamente posicionado para isolar uma falha ativa neste elemento, portanto não interromperá o fornecimento ao Ponto 1.

Passa-se então ao próximo elemento do caminho 1, o componente 021 (disjuntor). O disjuntor 021, além de fazer parte do caminho mínimo, também pertence à matriz de atuação da proteção do componente 004, estando adequadamente posicionado para isolar uma falha ativa deste componente, no caminho mínimo 1, causando interrupção no fornecimento ao Ponto 1.

Repete-se o mesmo procedimento para a caminho 2, encontrando o disjuntor 025 como responsável pelo isolamento da falha ativa no componente 004.

Como ambos os caminhos foram interrompidos, o componente 004 é um corte mínimo no modo de falha ativa.

5.6- CONCLUSÕES

A metodologia CSTDI- Confiabilidade de Sistemas de Transmissão e Distribuição com a consideração de Incertezas nos dados é uma técnica que permite a determinação de índices de confiabilidade para sistemas de grande porte. Os índices calculados são frequência de falha (falhas/ano), indisponibilidade total (horas/ano) e duração média da falha (horas), para cada ponto de carga, e para o sistema como um todo. Para os dois primeiros índices também são calculados as variâncias e os intervalos de confiança.

São considerados os seguintes modos de falha: falhas passivas ou permanentes, falhas ativas, falhas temporárias, falha ativa conjugada a disjuntor preso, e a influência da manutenção programada.

O método de cálculo da confiabilidade é a técnica dos cortes mínimos. Os dados necessários são: taxas e duração das falhas passivas e ativas, taxas e durações das manutenções programadas, tempo de chaveamento para os elementos dinâmicos N.A.,

probabilidade de disjuntor preso, e a topologia da rede. Além desses dados, deve ser fornecido o grau de incertezas nas taxas e durações de falha de cada componente, na forma de coeficiente de variação (σ/E), e o grau de incertezas nas taxas e durações da manutenção programada.

Por tela são especificados pelo usuário os nomes dos arquivos de entrada, saída (padrão CST), e saída considerando incertezas nos dados, e com uma opção de estudo de transmissão ou de distribuição. Se no arquivo de dados for feita opção para cálculo dos intervalos de confiança para os índices, o usuário deve fornecer, também pela tela, o nível de confiança desejado. Na tela serão fornecidas indicações sobre o processamento: subrotinas executadas, ponto de carga sob análise, eventuais erros, etc.

Os índices sem a consideração de incertezas são calculados primeiramente, e servem como entrada para o cálculo com a consideração de incertezas.

CAPÍTULO 6

TESTES E ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CSTD I A SISTEMAS

6.1- INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados vários resultados de cálculo da confiabilidade na presença de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo, efetuados em diversos sistemas.

Os sistemas utilizados apresentam diversas configurações retiradas da literatura: radiais, radiais com recurso(s), malhados, sistemas de distribuição, transmissão e subestações.

Os índices de confiabilidade descritos são a frequência de falha (Ff) em falhas por ano, e a indisponibilidade total (Uf) em horas por ano do ponto de carga ou do sistema como um todo, lembrando que (Pf é a probabilidade de falha):

$$U_f = P_f * 8760. \quad (6.1)$$

Serão apresentados os valores esperados ($E\{\}$), variâncias ($Var\{\}$) de cada índice, e coeficientes de variação percentual ($100 * \sigma / E\{\}$), calculados para diversos graus de incertezas nos dados, bem como seus respectivos intervalos de confiança.

Os graus de incertezas nos dados são definidos como nos Capítulos 4 e 5, através dos coeficientes de variação percentual das taxas de falha e das taxas de reparo, e taxas da manutenção programada, ou seja taxa de ocorrência da manutenção programada e taxa de reparo referente à manutenção programada.

Para as taxas de falha e reparo foram escolhidos dois coeficientes de variação: 15 e 30%. Estas variações permitem representar adequadamente o grau de incertezas nos dados,

possibilitando verificar o desempenho da metodologia quando da duplicação das incertezas das taxas.

No que tange à manutenção programada, devido ao fato de seu grau de incertezas ser geralmente menor do que o das taxas de falha e reparo, foram escolhidos coeficientes de variação menores, 2 e 10%.

Quanto aos níveis de confiança, optou-se apenas por 90%. Trata-se de um valor largamente empregado, e dadas as características conservativas da determinação dos intervalos de confiança via desigualdade de Chebyshev, foi considerado suficiente.

Há casos em que o coeficiente de variação (grau de incertezas) das taxas de falha, reparo ou manutenção programada é considerado igual a zero, no intuito de observar os efeitos correspondentes nos índices. A tabela 6.1 apresenta os vários casos possíveis de coeficientes percentuais de variação das taxas de falha, taxas de reparo e taxas de manutenção

Coeficientes de variação das taxas de falha	Coeficientes de variação das taxas de reparo	Coeficientes de variação da manutenção programada
15%	0%	0%
0%	15%	0%
15%	15%	0%
15%	15%	2%
15%	15%	10%
30%	0%	0%
0%	30%	0%
30%	30%	0%
30%	30%	2%
30%	30%	10%

Tabela 6.1- Casos possíveis para os coeficientes de variação dos dados

Um resumo das equações dos índices também é apresentado a seguir, para permitir a análise dos resultados.

6.2- EXPRESSÕES DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

A seguir são apresentadas as expressões dos índices de confiabilidade frequência de falha e indisponibilidade de falha, com o objetivo de dar suporte à análise de sensibilidade que se fará posteriormente.

6.2.1- Valor esperado da frequência de falha

A expressão completa do valor esperado que considera as incertezas nas taxas de falha, taxas de reparo, e taxas de manutenção programada dos componentes de um sistema é a seguinte:

$$E\{F_f\} = (F_f)_{bv} + \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n1p} |c_{1,f\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{1,f\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i}|_k \quad (6.2.a)$$

$$+ \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2p} |c_{2,f\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{2,f\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i} + c_{2,f\lambda_j} * \sigma^2_{\lambda_j} + c_{2,f\mu_j} * \sigma^2_{\mu_j}|_k \quad (6.2.b)$$

$$+ \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2pm} |c_{2,f\mu''_j} * \sigma^2_{\mu''_j} + c_{2,f\mu''_i} * \sigma^2_{\mu''_i}|_k \quad (6.2.c)$$

$$+ \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n1a} |c_{1,f\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{1,f\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i}|_k \quad (6.2.d)$$

$$+ \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2ap} |c_{2,f\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{2,f\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i} + c_{2,f\lambda_j} * \sigma^2_{\lambda_j} + c_{2,f\mu_j} * \sigma^2_{\mu_j}|_k \quad (6.2.e)$$

$$+ \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2am} |c_{2,f\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{2,f\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i} + c_{2,f\lambda''_j} * \sigma^2_{\lambda''_j} + c_{2,f\mu''_j} * \sigma^2_{\mu''_j}|_k \quad (6.2.f)$$

$$+ \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2adp} |c_{1,f\lambda_i} * p_j * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{1,f\mu_i} * p_j * \sigma^2_{\mu_i}|_k \quad (6.2.g)$$

$$F = \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n1t} |c_{1,t\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{1,t\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i}|_k \quad (6.2.h)$$

$$F = \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2tp} |c_{2,t\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{2,t\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i} + c_{2,t\lambda_j} * \sigma^2_{\lambda_j} + c_{2,t\mu_j} * \sigma^2_{\mu_j}|_k \quad (6.2.i)$$

$$F = \frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2tm} |c_{2,t\lambda_i} * \sigma^2_{\lambda_i} + c_{2,t\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i} + c_{2,t\lambda''_j} * \sigma^2_{\lambda''_j} + c_{2,t\mu''_j} * \sigma^2_{\mu''_j}|_k \quad (6.2.j)$$

(6.2)

Onde:

- $(FD)_{bV}$: frequência de falha calculada sem a consideração de incertezas nos dados.
- n1: número de cortes mínimos de primeira ordem, por:
 - p- falhas passivas (6.2.a).
 - a- falhas ativas (6.2.d).
 - t- falhas temporárias (6.2.h).
- n2: número de cortes mínimos de segunda ordem, por:
 - p- falhas passivas simultâneas em dois componentes (6.2.b)
 - pm- falha passiva de um componente quando um outro está em manutenção (6.2.c).
 - ap- falha ativa em um componente conjugada a falha passiva em outro (6.2.e)
 - am- falha ativa de um componente quando um outro está em manutenção (6.2.f)
 - adp- falha ativa de um componente conjugada a um disjuntor preso (6.2.g).
 - tp- falha temporária em um componente conjugada a falha passiva em outro (6.2.i).
 - tm- falha temporária em um componente quando um outro está em manutenção (6.2.j).
- k: corte mínimo.
- p_j : probabilidade do disjuntor j estar preso quando chamado a operar.
- $\sigma^2_{\lambda_i}, \sigma^2_{\lambda_j}$: variâncias das taxas de falha dos componentes i e j
- $\sigma^2_{\mu_i}, \sigma^2_{\mu_j}$: variâncias das taxas de reparo dos componentes i e j
- $\sigma^2_{\lambda''_i}, \sigma^2_{\lambda''_j}$: variâncias das taxas de manutenção programada dos componentes i e j

- $\sigma^2_{\mu^i}$, $\sigma^2_{\mu^j}$: variâncias das taxas de reparo referentes à manutenção programada dos componentes i e j .
- c_{1,λ_i} , c_{1,μ_i} (relativos a cortes de primeira ordem), c_{2,λ_i} , c_{2,μ_i} (relativos a cortes de segunda ordem), etc, são os coeficientes que medem a sensibilidade da frequência de falha às variações dos parâmetros de incerteza na expressão do valor esperado:

$$c_{1,\lambda_i} = \frac{\partial^2 (Ff)_{bv}}{\partial \lambda_i^2} \quad c_{2,\lambda_i} = \frac{\partial^2 (Ff)_{bv}}{\partial \lambda_i^2}$$

Onde:

- x_i pode ser λ_i , μ_i , λ_j , μ_j , λ^i , μ^i , etc.
- $(Ff)_{bv}$ é obtido das equações 5.1 para c_{1,λ_i} , c_{1,μ_i} e das equações 5.3 para c_{2,λ_i} , c_{2,μ_i} .

Para melhor compreensão ver Apêndice C.

Analisando a equação 6.2 acima, podem ser feitas algumas constatações:

- 1) Quando as variâncias das taxas de falha e reparo, taxa de manutenção programada e taxa de reparo referente à manutenção programada forem iguais a zero (coeficientes de variação dos dados iguais a zero) todos os termos que as contiverem são zerados. Assim, a expressão reduz-se então a $(Ff)_{bv}$, a frequência de falha calculada sem a consideração de incertezas nos dados.
- 2) As contribuições dos modos de falha com a consideração de incertezas são quocientes (ver Apêndice C), em que o divisor é da ordem do cubo das taxas de reparo. Portanto, a contribuição destas parcelas costuma ser bem menor do que o índice calculado sem a consideração de incertezas, ou seja as contribuições dos termos de 6.2.a a 6.2.j geralmente são muito menores do que $(Ff)_{bv}$.
- 3) Os termos referentes às variâncias da manutenção programada são em pequeno número perante os demais, levando a crer que sua influência não será tão grande. Esse comportamento deverá ocorrer tanto nas variâncias quanto no valor esperado da probabilidade de falha, uma vez que as hipóteses simplificadoras (ver seção 3.2.2.6)

desconsideram a manutenção programada como falha de primeira ordem. Os resultados obtidos comprovam estas observações.

6.2.2- Variância da frequência de falha

A expressão da variância da frequência de falha, que considera as incertezas nas taxas de falha, taxas de reparo e taxas de manutenção programada, é mostrada a seguir:

$$\text{Var}\{F_i\} = \sum_{k=1}^{n1p} [(b_{1,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{1,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i}] k \quad (6.3.a)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n2p} [(b_{2,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{2,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i} + (b_{2,f\lambda_j})^2 * \sigma^2_{\lambda_j} + (b_{2,f\mu_j})^2 * \sigma^2_{\mu_j}] k \quad (6.3.b)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n2pm} [(b_{2,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{2,f\lambda''_j})^2 * \sigma^2_{\lambda''_j} + (b_{2,f\mu''_j})^2 * \sigma^2_{\mu''_j} + \quad (6.3.c)$$

$$(b_{2,f\lambda_j})^2 * \sigma^2_{\lambda_j} + (b_{2,f\lambda''_i})^2 * \sigma^2_{\lambda''_i} + (b_{2,f\mu''_i})^2 * \sigma^2_{\mu''_i}] k$$

$$+ \sum_{k=1}^{n1a} [(b_{1,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{1,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i}] k \quad (6.3.d)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n2ap} [(b_{2,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{2,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i} + (b_{2,f\lambda_j})^2 * \sigma^2_{\lambda_j} + (b_{2,f\mu_j})^2 * \sigma^2_{\mu_j}] k \quad (6.3.e)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n2am} [(b_{2,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{2,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i} + (b_{2,f\lambda''_j})^2 * \sigma^2_{\lambda''_j} + (b_{2,f\mu''_j})^2 * \sigma^2_{\mu''_j}] k \quad (6.3.f)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n2adp} [(b_{1,f\lambda_i} * p_j)^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{1,f\mu_i} * p_j)^2 * \sigma^2_{\mu_i}] k \quad (6.3.g)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n1t} [(b_{1,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{1,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i}]_k \quad (6.3.h)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n2tp} [(b_{2,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{2,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i} + (b_{2,f\lambda_j})^2 * \sigma^2_{\lambda_j} + (b_{2,f\mu_j})^2 * \sigma^2_{\mu_j}]_k \quad (6.3.i)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n2tm} [(b_{2,f\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{2,f\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i} + (b_{2,f\lambda''_j})^2 * \sigma^2_{\lambda''_j} + (b_{2,f\mu''_j})^2 * \sigma^2_{\mu''_j}]_k \quad (6.3.j)$$

(6.3)

Todas as variáveis têm o mesmo significado da seção 6.2.1, mas ao invés de coeficientes c , trata-se dos coeficientes b .

- $b_{1,f\lambda_i}$, $b_{1,f\mu_i}$ (referentes aos cortes de primeira ordem), $b_{2,f\lambda_i}$, $b_{2,f\mu_i}$ (referentes aos cortes de segunda ordem), etc, são os coeficientes que medem a sensibilidade da frequência de falha às variações dos parâmetros de incerteza, na expressão da variância:

$$b_{1,fx_i} = \frac{\partial(Ff)_{bv}}{\partial x_i} \quad b_{2,fx_i} = \frac{\partial(Ff)_{bv}}{\partial x_i}$$

Onde:

- x_i pode ser λ_i , μ_i , λ_j , μ_j , λ''_i , μ''_i , etc.
- $(Ff)_{bv}$ é obtido das equações 5.1 para $b_{1,f\lambda_i}$, $b_{1,f\mu_i}$ e das equações 5.3 para $b_{2,f\lambda_i}$, $b_{2,f\mu_i}$.

Estes coeficientes são apresentados no Apêndice C.

Pode-se observar com base na equação 6.3, e no Apêndice C, que se a variância das taxas de falha (σ^2_{λ}) aproximar-se de zero, o valor da variância da frequência de falha diminuirá drasticamente. Os termos referentes as variâncias das taxas de falha são quocientes que têm as taxas de reparo (μ) como dividendos, que, geralmente, são muito maiores do que as taxas de falha (λ), que são os dividendos dos termos ligados às variâncias das taxas de reparo

As conclusões sobre a influência da manutenção programada feitas na seção 6.2.1 também são válidas neste caso.

6.2.3- Valor esperado da indisponibilidade total

A expressão para valor esperado da indisponibilidade total é análoga à equação 6.2, para frequência de falha, mas se diferencia pelos coeficientes c_i referentes à indisponibilidade total ($c_{1,u}$ e $c_{2,u}$), e por possuir termos diferentes nas contribuições por falha passiva estando um componente em manutenção programada, e nas falhas temporárias.

Portanto, a equação para o valor esperado da indisponibilidade total ($E\{Uf\}$) será semelhante a equação 6.2, apenas trocando os coeficientes c_{if} por c_{iu} , nos termos 6.2.a, 6.2.b, 6.2.d, 6.2.e, 6.2.f, 6.2.g. O termo 6.2.h não tem correspondente (o coeficiente c_{iu} para este caso é igual a zero), e os termos 6.2.c, 6.2.i e 6.2.j, sofrem modificações (além da troca de frequência por indisponibilidade) para converterem-se em 6.4.c, 6.4.h, e 6.4.i, e são mostrados a seguir:

$$\frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2pm} |c_{2,u\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i} + c_{2,u\mu''_j} * \sigma^2_{\mu''_j} + c_{2,u\mu_j} * \sigma^2_{\mu_j} + c_{2,u\mu''_i} * \sigma^2_{\mu''_i}| k \quad (6.4.c)$$

$$\frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2lp} |c_{2,u\mu_i} * \sigma^2_{\mu_i} + c_{2,u\mu_j} * \sigma^2_{\mu_j}| k \quad (6.4.h)$$

$$\frac{1}{2} * \sum_{k=1}^{n2lm} |c_{2,u\mu''_i} * \sigma^2_{\mu''_i} + c_{2,u\mu''_j} * \sigma^2_{\mu''_j}| k \quad (6.4.i)$$

Todas as outras variáveis têm o mesmo significado da seção 6.2.1, lembrando que:

$$c_{1,u x_i} = \frac{\partial^2 (Uf)_{bv}}{\partial x_i^2} \quad c_{2,u x_i} = \frac{\partial^2 (Uf)_{bv}}{\partial x_i^2}$$

Onde:

- x_i pode ser $\lambda_i, \mu_i, \lambda_j, \mu_j, \lambda''_i, \mu''_i$, etc.

- $(UF)_{bv}$ é obtido das equações 5.1 para $c_{1,u\lambda_i}$, $c_{1,u\mu_i}$ e das equações 5.3 para $c_{2,u\lambda_i}$, $c_{2,u\mu_i}$

Os coeficientes relacionados com as variâncias das taxas de falha são todos negativos (ver Apêndice C). Quando o coeficiente de variação das taxas de falha tender a zero, as contribuições dos modos de falha irão aumentar o valor de $E\{UF\}$.

Os coeficientes relacionados as taxas de reparo são quase todos positivos, e ressalte-se que as variâncias das taxas de reparo tendem a ser muito maiores do que as das taxas de falha (dado que as taxas de reparo são muito maiores do que as taxas de falha). Sendo assim, quando o coeficiente de variação das taxas de reparo (e por consequência suas variâncias) tender a zero as contribuições de cada modo de falha irão reduzir o valor de $E\{UF\}$.

6.2.4- Variância da indisponibilidade total

Pode-se nesta seção fazer uma analogia semelhante a que foi feita anteriormente, trocando os coeficientes b_{if} por b_{iu} , e alterando os termos 6.3.c e 6.3.h. A seguir são apresentados os termos 6.5.c e 6.5.h que fazem parte da expressão da variância da indisponibilidade total.

$$\sum_{k=1}^{n\lambda} (b_{2,u\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} + (b_{2,u\mu_i})^2 * \sigma^2_{\mu_i} + (b_{2,u\lambda''_j})^2 * \sigma^2_{\lambda''_j} + (b_{2,u\mu''_j})^2 * \sigma^2_{\mu''_j} +$$

$$(b_{2,u\lambda_j})^2 * \sigma^2_{\lambda_j} + (b_{2,u\mu_j})^2 * \sigma^2_{\mu_j} + (b_{2,u\lambda''_i})^2 * \sigma^2_{\lambda''_i} + (b_{2,u\mu''_i})^2 * \sigma^2_{\mu''_i} | k$$

(6.5.c)

$$\sum_{k=1}^{n\lambda} (b_{1,u\lambda_i})^2 * \sigma^2_{\lambda_i} | k$$

(6.5.h)

6.2.5- Conclusões gerais sobre as expressões dos índices

Alterações nos coeficientes de variação das taxas de falha e reparo dos componentes de um sistema vão causar efeito mais significativo nas variâncias dos índices do que no seu valor esperado. Isso ocorre devido a inexistência do valor b_v (sem consideração de incertezas) nas expressões das variâncias. Considerando que ambos os coeficientes de variação (graus de incertezas das taxas de falha e das taxas de reparo) sejam diferentes de zero, dobrar os seus valores acarretará em efeito semelhante nas variâncias dos índices, resultando em coeficientes de variação igualmente maiores.

As mudanças feitas no coeficiente de variação das taxas de manutenção programada, além de causarem relativamente pouco efeito sobre os índices, podem refletir-se igualmente em ambos (valor esperado e variância) não alterando significativamente o coeficiente de variação dos índices. E como as hipóteses simplificadoras desconsideram a manutenção como falha de primeira ordem, sua influência não será grande.

No valor esperado, o índice calculado sem a consideração de incertezas é predominante. Muitas vezes, as contribuições devidas às incertezas podem vir a fazer com que o valor esperado calculado com incertezas seja menor do que aquele sem essa consideração. Isso ocorre porque muitos dos termos que compõem a expressão do valor esperado são negativos, mas, como há interesse em determinar-se limites de confiança para os índices, o valor sem incertezas deverá estar contido no intervalo de confiança.

6.3- SISTEMAS ANALISADOS

A seguir serão apresentados os principais sistemas aos quais a metodologia CSTDI foi aplicada, os resultados obtidos e as conclusões.

6.3.1- Sistema 1- Subestação de distribuição [8]

O primeiro sistema analisado foi uma subestação de distribuição proveniente da referência [8], cujo grafo é mostrado na Figura 6.1. Possui dois pontos fonte e apenas um ponto de carga, e cinco tipos de componentes: componentes 1 e 2 são linhas de transmissão; 3, 4 e 5 são disjuntores de alta tensão; 10 e 11 são disjuntores de baixa tensão; 6 e 7 são chaves seccionadoras; 8 e 9 são transformadores de força; 12 é barramento de baixa tensão.

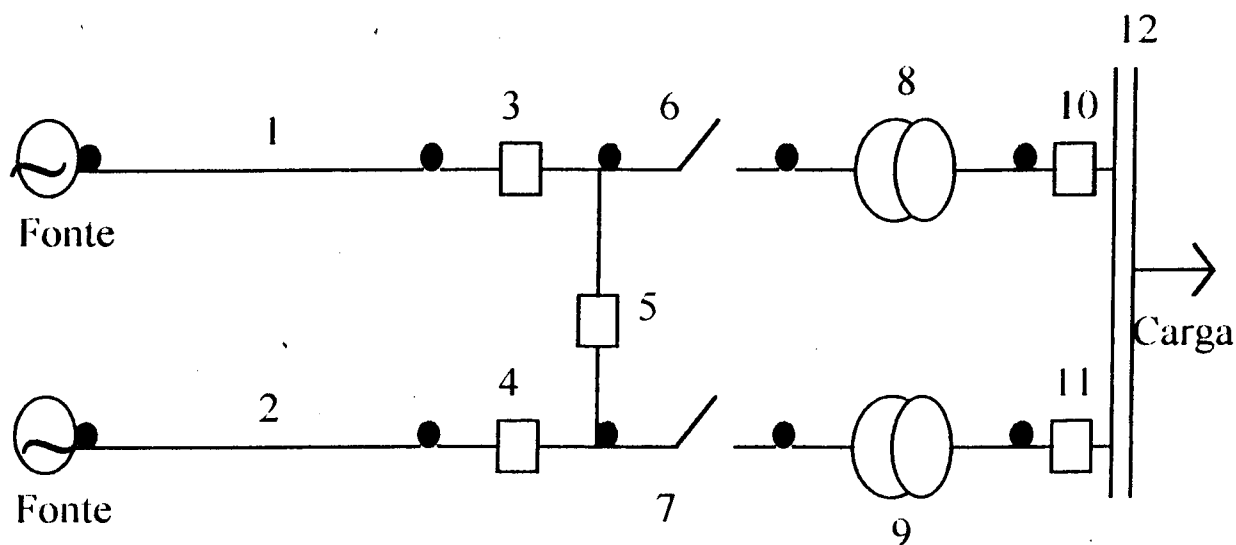


Figura 6.1 - Sistema 1- Subestação de distribuição simplificada (referência [8])

Os dados dos componentes são mostrados na tabela 6.2.

Comp.	λ (f/ano)	r (h)	λ'' (oc/ano)	r'' (h)	λ' (f/ano)	r' (h)	p
Linhas	0.09	7.33	1.0	8.0	0.09	1.0	
Disj. AT	0.23	11.13	0.25	24.0	0.03	2.0	0.005
Seccion.	0.22	2.09	0.25	4.0	0.02	3.0	
Transf.	0.10	1000.0	0.50	48.0	0.10	1.0	
Disj. BT	0.02	3.0	0.25	12.0	0.01	1.0	0.06
Barram.	0.024	2.0	0.00	0.0	0.024	2.0	

Tabela 6.2- Dados dos componentes do Sistema 1.

Onde:

λ , λ' , λ'' - taxa de falha passiva, ativa e de manutenção programada do componente, respectivamente.

r , r' , r'' - duração da falha passiva, ativa e da manutenção programada do componente, respectivamente.

p - probabilidade do disjuntor permanecer preso quando chamado a operar.

6.3.1.1- Resultados da aplicação da metodologia CSTDI ao Sistema 1

Os índices calculados foram a frequência de falha e a indisponibilidade total do ponto de carga. Os valores sem a consideração de incertezas foram:

$$(Ff)_{bv} = 0.106101 \text{ falhas/ano}$$

$$(Uf)_{bv} = 1.33834 \text{ horas/ano}$$

O valor esperado, variância, coeficiente de variação, e limites para 90% de confiança da frequência de falha e indisponibilidade total do Sistema 1 são apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4. f , r e m são os coeficientes de variação percentuais das taxas de falha, reparo e manutenção programada, respectivamente, e representam seus graus de incertezas.

Incertezas (%)	$E\{Ff\}$ (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Ff (f/ano)	
				Inferior	Superior
$f=15, r=0, m=0$	0.1061E+00	0.1007E-01	9.5	0.7425E-01	0.1379E+00
$f=0, r=15, m=0$	0.1063E+00	0.6463E-03	0.6	0.1042E+00	0.1083E+00
$f=15, r=15, m=0$	0.1063E+00	0.1012E-01	9.5	0.7430E-01	0.1383E+00
$f=15, r=15, m=2$	0.1063E+00	0.1012E-01	9.5	0.7430E-01	0.1383E+00
$f=15, r=15, m=10$	0.1063E+00	0.1013E-01	9.5	0.7430E-01	0.1384E+00
$f=30, r=0, m=0$	0.1061E+00	0.2014E-01	19	0.4239E-01	0.1698E+00
$f=0, r=30, m=0$	0.1069E+00	0.1293E-02	1.2	0.1028E+00	0.1110E+00
$f=30, r=30, m=0$	0.1069E+00	0.2023E-01	18.9	0.4288E-01	0.1708E+00
$f=30, r=30, m=2$	0.1069E+00	0.2023E-01	18.9	0.4288E-01	0.1708E+00
$f=30, r=30, m=10$	0.1069E+00	0.2024E-01	18.9	0.4290E-01	0.1709E+00

Tabela 6.3- Valores para frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Uf} (h/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (h/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Uf(h/ano)	
				Inferior	Superior
f=15,r=0, m=0	0.1338E+01	0.2451E+00	18.3	0.5628E+00	0.2113E+01
f=0,r=15,m=0	0.1392E+01	0.2451E+00	17.6	0.6167E+00	0.2167E+01
f=15,r=15,m=0	0.1392E+01	0.3466E+00	24.9	0.2952E+00	0.2487E+01
f=15,r=15,m=2	0.1392E+01	0.3466E+00	24.9	0.2952E+00	0.2487E+01
f=15,r=15,m=10	0.1392E+01	0.3466E+00	24.9	0.2960E+00	0.2488E+01
f=30,r=0,m=0	0.1336E+01	0.4902E+00	36.7	0.0	0.2886E+01
f=0,r=30,m=0	0.1552E+01	0.4902E+00	31.6	0.1893E-02	0.3102E+01
f=30,r=30,m=0	0.1550E+01	0.6932E+00	44.7	0.0	0.3742E+01
f=30,r=30,m=2	0.1550E+01	0.6932E+00	44.7	0.0	0.3742E+01
f=30,r=30,m=10	0.1550E+01	0.6932E+00	44.7	0.0	0.3742E+01

Tabela 6.4- Valores para indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Quando o limite inferior assume valores negativos, usa-se igualá-lo a zero.

6.3.1.2- Observações

Trata-se de um sistema radial com apenas um ponto de carga. Somente 4 caminhos mínimos entre fonte(s) e carga são identificados (mostrados na tabela 6.5). Não há componentes N.A. (normalmente abertos), logo não há possibilidade de ocorrência de falhas temporárias (falhas passivas sanadas por chaveamentos de elementos N.A.).

Como quase todos os componentes têm taxa de manutenção programada, há vários cortes mínimos do tipo: falha passiva ou ativa de um componente estando outro em manutenção programada não listados nesta análise. Devido ao fato de que as taxas de manutenção programada podem ser até dez vezes maiores do que as taxas de falha, o valor de suas contribuições aos índices de confiabilidade é, em muitos casos, maior do que a dos cortes por falhas simultâneas. Um exemplo disso é o corte mínimo, por falha passiva simultânea nos componentes 1 e 2 do Sistema 1, e o corte mínimo por falha passiva no componente 1 estando o componente 2 em manutenção:

Falhas simultâneas- $Ff = 0.135E-04$ f/ano, $Uf = 0.493E-04$ h/ano.

Falha/manutenção- $Ff = 0.164E-03$ f/ano, $Uf = 0.627E-03$ h/ano.

Não obstante as taxas de falha ativa apresentarem valores menores ou iguais às taxas de falha passiva, o valor total das contribuições dos cortes envolvendo falhas ativas é maior do que o dos cortes envolvendo falha passiva (no que tange à frequência de falha):

Falhas passivas- $FF = 0.320E-01$ f/ano, $Uf = 0.120E+01$ h/ano

Falhas ativas- $FF = 0.508E-01$ f/ano, $Uf = 0.815E-01$ h/ano.

Isso se explica pela existência de três cortes mínimos de primeira ordem por falhas ativas, e apenas um por falha passiva no Sistema 1. Como as contribuições dos cortes mínimos de primeira ordem apresentam maior grandeza, o modo de falha que apresentar mais cortes de primeira ordem deverá ser predominante.

Os coeficientes de variação da frequência de falha do Sistema 1 são sempre menores do que os dos componentes, enquanto que os da indisponibilidade são sempre maiores. De acordo com as tabelas 6.3 e 6.4, não há uma relação direta entre os coeficientes de variação dos dados e dos índices: coeficientes de variação das taxas de falha e reparo de 15% não implicam em frequência de falha e indisponibilidade total com igual valor de coeficiente de variação (no caso obtêm-se 9,5% e 24,9% respectivamente).

6.3.1.3- Particularidades do Sistema 1.

Por se tratar de um sistema tipicamente radial, as alterações propostas na seção 5.5 devem ser aplicadas ao Sistema 1. Isso permite a correta identificação do disjuntor (ou subestação) que isola cada falha ativa, ou se o componente do corte mínimo que está isolado para reparo interrompe o fornecimento. Na tabela 6.5 são apresentados os caminhos mínimos entre fonte(s) e carga, indicando o número e os componentes do sistema que deles fazem parte.

Caminho mínimo	Componentes do caminho
1	12, 10, 8, 6, 3, 1
2	12, 11, 9, 7, 4, 2
3	12, 10, 8, 6, 5, 4, 2
4	12, 11, 9, 7, 5, 3, 1

Tabela 6.5 - Caminhos mínimos do Sistema 1

Nas tabelas 6.6 e 6.7 são apresentados os componentes responsáveis pelo isolamento das falhas ativas e interrupção do fornecimento à carga, em cada caminho mínimo, para um corte mínimo nos modos falha ativa e falha ativa conjugada a disjuntor preso, a título de exemplo. Os resultados completos estão no Apêndice C.

Na tabela 6.6 o componente que sofre falha ativa é aquele que a proteção deve isolar, e que neste processo pode causar a interrupção do fornecimento à carga em um caminho mínimo. Neste caso o disjuntor que isola a falha ativa é o componente que interrompe o fornecimento. Se não houver disjuntor a montante do componente que sofreu falha ativa, a falha deverá ser isolada pela subestação. Se todos os caminhos mínimos forem interrompidos um corte mínimo foi identificado. Além dos disjuntores e da subestação, o fornecimento à carga também pode ser interrompido pelo componente que sofre falha passiva, se for um corte mínimo de segunda ordem.

Na tabela 6.7, se a proteção atuasse corretamente, o componente que sofre falha ativa não iria provocar a interrupção do fornecimento à carga. Como, porém, conjugada à falha ativa há um disjuntor preso, a proteção de retaguarda (outro disjuntor ou a subestação) tem que atuar, e neste processo interrompe o fornecimento. É bom ressaltar também, que a proteção de retaguarda deve isolar ambas as falhas (a falha ativa e o disjuntor preso). Novamente se todos os caminhos mínimos forem interrompidos identificou-se um corte mínimo.

Componente que sofre falha ativa	Componente que sofre falha passiva	Caminho	Componente que interrompe fornec.
4	6	1	6
4	6	2	Subestação
4	6	3	Subestação
4	6	4	5

Tabela 6.6- Componentes que interrompem o fornecimento no modo falhas ativas no Sistema I.

Observando a figura 6.1 e as tabelas 6.5 e 6.6 pode-se observar:

- no caminho mínimo 1, a falha ativa do componente 4 não interrompe o fornecimento à carga (deverá ser isolada pela subestação), mas como o componente 6 sofre falha passiva (e pertence ao caminho mínimo 1) o fornecimento é interrompido.
- no caminho mínimo 2, o componente 4 pertence ao caminho, e sua falha ativa precisa ser isolada pela subestação, o que causa a interrupção no fornecimento à carga.
- no caminho mínimo 3 ambos os componentes (4 e 6) pertencem ao caminho, e como o 4 é que sofre a falha ativa, a subestação interrompe o fornecimento.
- no caminho mínimo 4 nenhum dos componentes do corte mínimo pertence ao caminho, mas a falha ativa no componente 4 precisa ser isolada pelo disjuntor 5.
- como houve interrupção do fornecimento à carga em todos os caminhos, os componentes 4 e 6 constituem um corte mínimo para este modo de falha.

Componente que sofre falha ativa	Disjuntor preso	Caminho	Componente que interrompe o fornec.
3	5	1	Subestação
3	5	2	4
3	5	3	4
3	5	4	Subestação

Tabela 6.7 - Componentes que interrompem o fornecimento no modo falha ativa conjugada a disjuntor preso no Sistema 1.

Observando a figura 6.1 e as tabelas 6.5 e 6.7 pode-se observar:

- no caminho mínimo 1, a falha ativa no componente 3 por si só já interromperia o fornecimento, pois a proteção da subestação atua (o fato do disjuntor 5 estar preso não importa, por não pertencer a este caminho mínimo).
- no caminho mínimo 2, a falha ativa no componente 3 não interromperia o fornecimento (seria isolada pelo disjuntor 5), como o disjuntor 5 está preso, porém, torna-se necessário que o disjuntor 4 atue, interrompendo o fornecimento à carga.
- no caminho mínimo 3, a falha ativa do componente 3 por si só também interromperia o fornecimento (o disjuntor 5 atua), mas como o disjuntor 5 está preso, o disjuntor 4 precisa atuar para isolar ambas as falhas.

- no caminho mínimo 4, a falha ativa do componente 3 novamente interrompe o fornecimento, exigindo a atuação da proteção da subestação (como o disjuntor 5, preso, está a jusante do componente 3 neste caminho, a subestação isolará ambas as falhas).
- como todos os caminhos mínimos foram interrompidos, os componentes 3 e 5 constituem um corte mínimo para este modo de falha.

Os tempos de processamento para o Sistema 1 variaram de 2.02 segundos para os casos com coeficiente de variação da manutenção programada igual a zero, a 2.07 segundos, em que foi assumido como 10% de incerteza, em uma estação de trabalho (que não estava ligada em rede) SUN SPARC station 2.

6.3.2- Sistema 2- Subestação de 500kV a disjuntor e meio

O Sistema 2 é uma subestação projetada da ELETROSUL, com esquema de manobras disjuntor e meio (para 500 kV), proveniente da referência [11]. O grafo do sistema é mostrado na figura 6.2

Trata-se de um sistema malhado que apresenta três pontos fonte e três pontos de carga. Há quatro tipos de componentes, e o grafo do Sistema 2 é mostrado na figura 6.2: na figura as linhas duplas indicam barramentos, e as linhas simples são chaves auxiliares (consideradas 100% confiáveis). Os dados dos componentes são apresentados na tabela 6.8.

Há manutenção programada apenas nos disjuntores, e sua taxa é dez vezes maior do que a taxa de falhas passivas e ativas. O disjuntor também tem probabilidade de estar preso quando chamado a operar. Não existem componentes N.A. no sistema, portanto não haverá falhas temporárias (passivas que podem ser sanadas pelo chaveamento de componentes N.A.).

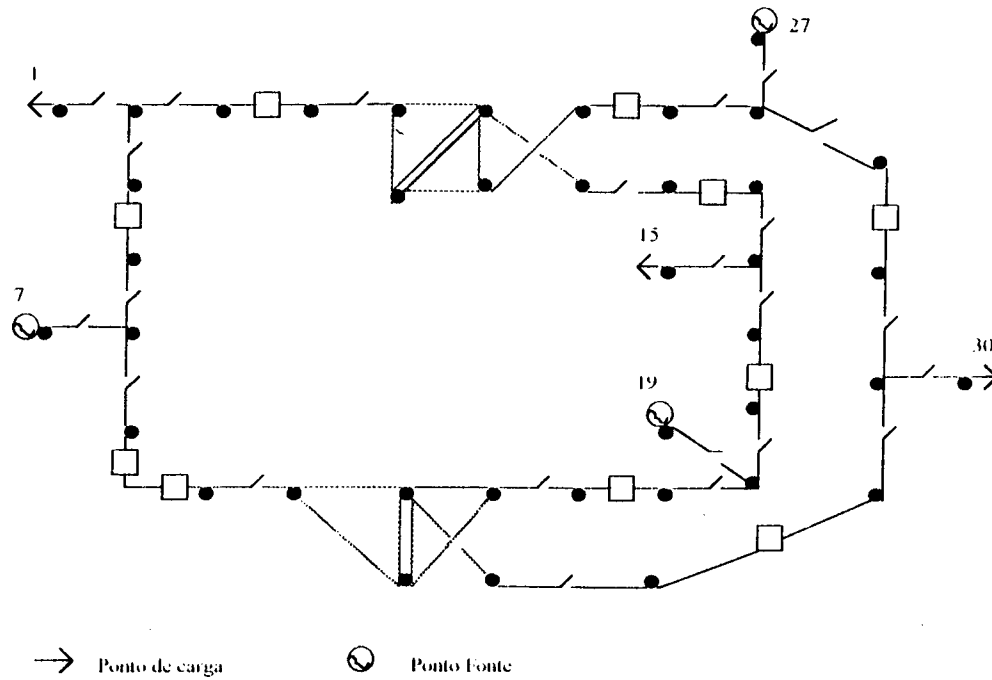


Figura 6.2 - Grafo do Sistema 2- Subestação de 500 kV a disjuntor e meio.

Componentes	λ (f/ano)	r (h)	λ'' (f/ano)	r'' (h)	λ' (f/ano)	r' (h)	p
Disjuntor	0.05	36	0.5	10	0.05	0.5	0.005
Barramento	0.007	4	0.	0.	0.007	2	-
Seccionadora	0.003	6	0.	0.	0.003	2	-

Tabela 6.8 - Dados dos componentes do Sistema 2

Os símbolos da tabela 6.8 têm o mesmo significado da tabela 6.2.

6.3.2.1 - Resultados da aplicação da metodologia CSTDI ao Sistema 2

Como o Sistema 2 tem três pontos de carga, seria necessário mostrar os resultados para cada um, e para o sistema como um todo. Os três pontos, porém, apresentam resultados praticamente idênticos, de modo que conclusões semelhantes podem ser tiradas para todos.

Assim sendo, serão apresentados os índices de confiabilidade calculados para o ponto 15 e para o sistema como um todo.

Os valores de frequência de falha e indisponibilidade total para o ponto 15 e para o sistema são apresentados na tabela 6.9.

	(Ff)bv (f/ano)	(Uf)bv (h/ano)
Ponto 15	0.110095E+00	0.815542E-01
Sistema*	0.927912E-02	0.566234E-01

Tabela 6.9 - Índices de confiabilidade sem a consideração de incertezas (*somente falhas passivas).

Os resultados conferem com os da referência [11]. Os índices de desempenho para o sistema são menores do que os do ponto de carga 15 devido ao fato de que os índices para o sistema envolvem apenas falhas passivas.

O valor esperado, variância, coeficiente de variação e limites para 90% de confiança, da frequência de falha e indisponibilidade total, são apresentados nas tabelas 6.10 e 6.11 para o ponto 15, e nas tabelas 6.12 e 6.13 para o sistema (onde f, r e m são os coeficientes de variação das taxas de falha, de reparo e de manutenção programada, respectivamente, e representam seus graus de incertezas).

Incertezas (%)	E{Ff} (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Ff(f/ano)	
				Inferior	Superior
f=15,r=0,m=0	0.1101E+00	0.1115E-01	10.1	0.7484E-01	0.1453E+00
f=0,r=15,m=0	0.1101E+00	0.5256E-05	0.0	0.1101E+00	0.1101E+00
f=15,r=15,m=0	0.1101E+00	0.1115E-01	10.1	0.7484E-01	0.1453E+00
f=15,r=15,m=2	0.1101E+00	0.1115E-01	10.1	0.7484E-01	0.1453E+00
f=15,r=15,m=10	0.1101E+00	0.1115E-01	10.1	0.7484E-01	0.1454E+00
f=30,r=0,m=0	0.1101E+00	0.2230E-01	20.2	0.3959E-01	0.1806E+00
f=0,r=30,m=0	0.1101E+00	0.1051E-04	0.01	0.1101E+00	0.1101E+00
f=30,r=30,m=0	0.1101E+00	0.2230E-01	20.2	0.3960E-01	0.1806E+00
f=30,r=30,m=2	0.1101E+00	0.2230E-01	20.2	0.3960E-01	0.1806E+00
f=30,r=30,m=10	0.1101E+00	0.2230E-01	20.2	0.3959E-01	0.1806E+00

Tabela 6.10 - Valores para frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%, para o ponto 15.

Incertezas (%)	E{Uf} (h/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (h/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Uf(h/ano)	
				Inferior	Superior
f=15,r=0, m=0	0.8155E-01	0.8195E-02	10.0	0.5564E-01	0.1075E+00
f=0,r=15,m=0	0.8339E-01	0.8195E-02	9.8	0.5748E-01	0.1093E+00
f=15,r=15,m=0	0.8339E-01	0.1159E-01	13.9	0.4674E-01	0.1200E+00
f=15,r=15,m=2	0.8339E-01	0.1159E-01	13.9	0.4674E-01	0.1200E+00
f=15,r=15,m=10	0.8340E-01	0.1159E-01	13.9	0.4675E-01	0.1200E+00
f=30,r=0,m=0	0.8155E-01	0.1639E-01	20.1	0.2973E-01	0.1334E+00
f=0,r=30,m=0	0.8889E-01	0.1639E-01	18.4	0.3707E-01	0.1407E+00
f=30,r=30,m=0	0.8889E-01	0.2318E-01	26.1	0.1560E-01	0.1622E+00
f=30,r=30,m=2	0.8889E-01	0.2318E-01	26.1	0.1560E-01	0.1622E+00
f=30,r=30,m=10	0.8890E-01	0.2318E-01	26.1	0.1561E-01	0.1622E+00

Tabela 6.11- Valores para indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90% para o ponto 15.

Incertezas (%)	E{Ff} (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Ff(f/ano)	
				Inferior	Superior
f=15,r=0, m=0	0.9279E-02	0.7795E-03	8.4	0.6814E-02	0.1174E-01
f=0,r=15,m=0	0.9281E-02	0.3810E-05	0.04	0.9269E-02	0.9293E-02
f=15,r=15,m=0	0.9281E-02	0.7795E-03	8.4	0.6816E-02	0.1174E-01
f=15,r=15,m=2	0.9281E-02	0.7796E-03	8.4	0.6816E-02	0.1175E-01
f=15,r=15,m=10	0.9283E-02	0.7810E-03	8.4	0.6813E-02	0.1175E-01
f=30,r=0,m=0	0.9279E-02	0.1559E-02	16.8	0.4349E-02	0.1421E-01
f=0,r=30,m=0	0.9286E-02	0.7619E-05	0.08	0.9262E-02	0.9310E-02
f=30,r=30,m=0	0.9286E-02	0.1559E-02	16.8	0.4356E-02	0.1422E-01
f=30,r=30,m=2	0.9286E-02	0.1559E-02	16.8	0.4356E-02	0.1422E-01
f=30,r=30,m=10	0.9288E-02	0.1560E-02	16.8	0.4356E-02	0.1422E-01

Tabela 6.12 - Valores para frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%, para o Sistema 2.

Incertezas (%)	E{Uf} (h/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (h/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Uf(h/ano)	
				Inferior	Superior
f=15,r=0,m=0	0.5662E-01	0.4679E-02	8.3	0.4183E-01	0.7142E-01
f=0,r=15,m=0	0.5789E-01	0.4678E-02	8.1	0.4310E-01	0.7269E-01
f=15,r=15,m=0	0.5789E-01	0.6617E-02	11.4	0.3697E-01	0.7882E-01
f=15,r=15,m=2	0.5790E-01	0.6617E-02	11.4	0.3697E-01	0.7882E-01
f=15,r=15,m=10	0.5793E-01	0.6620E-02	11.4	0.3699E-01	0.7886E-01
f=30,r=0,m=0	0.5662E-01	0.9358E-02	16.5	0.2703E-01	0.8621E-01
f=0,r=30,m=0	0.6170E-01	0.9357E-02	15.2	0.3212E-01	0.9129E-01
f=30,r=30,m=0	0.6170E-01	0.1323E-01	21.4	0.1986E-01	0.1036E+00
f=30,r=30,m=2	0.6171E-01	0.1323E-01	21.4	0.1986E-01	0.1036E+00
f=30,r=30,m=10	0.6174E-01	0.1324E-01	21.4	0.1989E-01	0.1036E+00

Tabela 6.13- Valores para indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90% para o Sistema 2.

6.3.2.2 - Observações

O Sistema 2 é um sistema malhado com três pontos de carga e três pontos fonte. Onze caminhos mínimos entre fonte e carga são identificados (quase o triplo do Sistema 1).

O número de cortes mínimos envolvendo manutenção programada não é tão grande como no Sistema 1, uma vez que apenas um tipo de componente possui taxa de manutenção programada. Mesmo assim, por ser esta taxa cerca de dez vezes maior do que as taxas de falha passiva e ativa, a contribuição dos cortes mínimos envolvendo manutenção programada é superior as dos cortes por falhas simultâneas (passivas, ou ativa e passiva).

Para cada ponto de carga foram identificados quatro falhas ativas de primeira ordem, e apenas uma falha passiva de primeira ordem. Isso implica em que o valor das contribuições por falhas ativas é maior do que o das falhas passivas (tal como no Sistema 1), uma vez que as contribuições dos cortes mínimos de primeira ordem são predominantes.

A diferença entre os coeficientes de variação dos índices para o ponto 15 e o sistema, deve-se ao fato de que são consideradas para o sistema apenas as falhas passivas, com a determinação dos cortes mínimos do sistema feita como descrita na seção 3.3.3.5.

Novamente, tal como no Sistema 1, verifica-se que coeficientes de variação dos dados e dos índices de confiabilidade são diferentes, e que duplicando a incerteza nos dados, dobra-se o valor das incertezas dos índices. Consta-se que não há como prever, antes de aplicar a metodologia CSDI a um sistema, qual será o valor percentual dos coeficientes de variação dos índices de confiabilidade, inclusive se serão maiores ou menores do que os coeficientes de variação dos dados.

Os coeficientes de variação dos índices de confiabilidade para o sistema, não obstante seu menor valor, seguem a mesma tendência dos coeficientes dos pontos de carga.

No que tange aos tempos de processamento, variaram de 5.45 segundos, para os casos com coeficiente de variação da manutenção programada igual a zero, a 5.59 segundos, para coeficiente de variação da manutenção programada de 10%.

6.3.3 - Sistema 3- Sistema de distribuição ligado à barra 2 do sistema RBTS-IEEE [45]

O Sistema 3 é um sistema de distribuição ligado à barra 2 do RBTS- Roy Billinton Test System [44]. O RBTS é um sistema com apenas seis barras, desenvolvido com fins educacionais por uma equipe da Universidade de Saskatchewan, para estudos de confiabilidade de geração e confiabilidade composta (geração-transmissão). Posteriormente, foram sugeridos dois sistemas de distribuição, também com propósitos educacionais, que são ligados a duas das barras do RBTS (a 2 e a 4), para estudos de confiabilidade de sistemas de distribuição [45].

O Sistema 3 é um sistema radial, com recursos de chaveamento de dois componentes N.A. (normalmente abertos). Apresenta apenas um ponto fonte, vinte e dois pontos de carga, e dois níveis de tensão, 33 e 11kV. O grafo do sistema é mostrado na figura 6.3.

Para manter a uniformidade com os estudos realizados na referência [45] (para permitir a comparação dos resultados), algumas simplificações foram feitas:

- todos os disjuntores, fusíveis e seccionadoras são considerados 100% confiáveis (não há falhas por disjuntor ou fusível preso).
- os equipamentos com tensão de 33kV (barramentos, linhas, transformadores, etc) são considerados 100% confiáveis.
- os barramentos de 11kV também são considerados 100% confiáveis.
- consideram-se as linhas de distribuição como aéreas, tais como a maioria existente nos sistemas de distribuição no Brasil.
- não é considerada manutenção programada em nenhum equipamento.

Na tabela 6.14 são apresentados os dados dos componentes do Sistema 3 (os símbolos têm o mesmo significado das tabelas 6.2 e 6.8).

Componentes	λ (f/ano)	r (horas)	λ' (f/ano)	r' (horas)
Linhas 0.6km	0.039	5.	0.039	1.
Linhas 0.75km	0.049	5.	0.049	1.
Linhas 0.8km	0.052	5.	0.052	1.
Transf 11/415kv	0.015	200.	0.015	1.

Tabela 6.14 - Dados dos componentes do Sistema 3.

Apresenta-se a seguir o grafo do sistema 3:

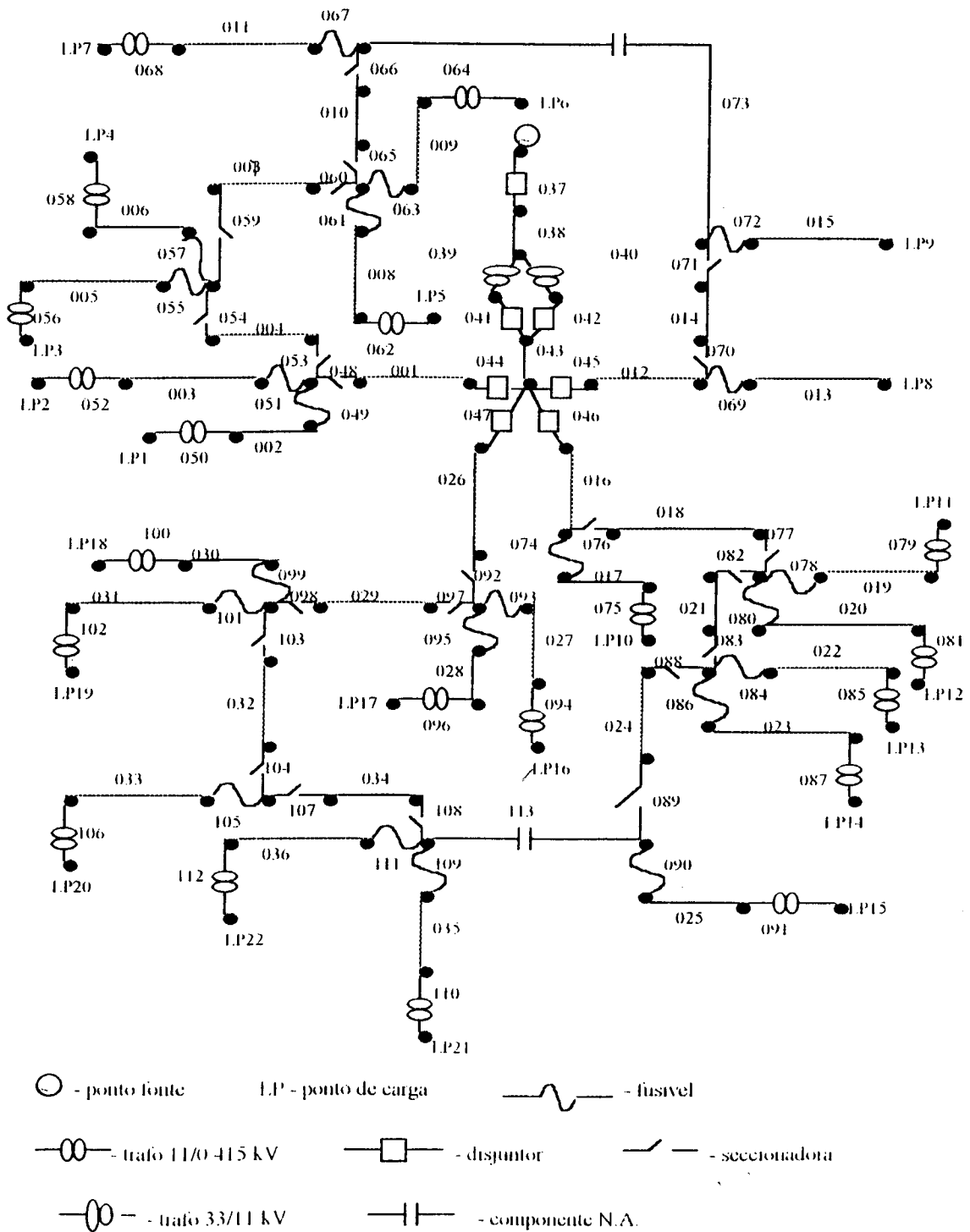


Figura 6.3 - Sistema 3- Sistema radial com vinte e dois pontos de carga, cento e treze componentes.

Alguns esclarecimentos necessitam ser feitos:

- os componentes de número 002, 006, 010, 014, 017, 021, 025, 028, 030 e 034 são linhas de 0.6 km.
- os componentes de número 001, 004, 007, 009, 012, 016, 019, 022, 024, 027, 029, 032 e 035 são de 0.75 km.
- os componentes 003, 005, 008, 011, 013, 015, 018, 020, 023, 026, 031, 033, e 036 são de 0.8 km.
- os disjuntores de 11 kV são os de número 041, 042, 044, 045, 046, e 047.
- o componente 037 é um disjuntor de 33 kV.
- os componentes 039 e 040 são transformadores de 33/11 kV.
- os componentes 050, 052, 056, 058, 062, 064, 068, 075, 079, 081, 085, 087, 091, 096, 100, 102, 106, 110, 112 são transformadores de 11/0.415 kV.
- as seccionadoras N.A. são os componentes de número 073 e 113.

6.3.3.1 - Resultados da aplicação da metodologia CSTDÍ ao Sistema 3.

Em primeiro lugar é apresentada uma comparação entre os índices de confiabilidade sem a consideração de incertezas, calculados pela referência [45] e pela metodologia CSTDÍ. Na tabela 6.15 são apresentados, para cada ponto de carga, a frequência de falha e a indisponibilidade total (não há resultados para o sistema como um todo na referência [45]). Ff é frequência de falha, e Uf é indisponibilidade total.

Pontode Carga	Referência [45]		Metodologia CSTDÍ	
	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)
LP 1	0.240	3.58	0.240	3.38
LP 2	0.253	3.64	0.253	3.45
LP 3	0.253	3.64	0.253	3.45
LP 4	0.240	3.58	0.240	3.38
LP 5	0.253	3.64	0.253	3.45
LP 6	0.250	3.63	0.250	3.43
LP 7	0.253	3.60	0.253	3.45
LP 8	0.140	0.54	0.140	0.35
LP 9	0.140	0.50	0.140	0.35
LP 10	0.243	3.58	0.243	3.38

Tabela 6.15 - Índices de confiabilidade sem consideração de incertezas para o Sistema 3.

Pontode Carga	Referência [45]		Metodologia CSTDI	
	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)
LP 11	0.253	3.64	0.253	3.43
LP 12	0.256	3.66	0.256	3.45
LP 13	0.253	3.59	0.252	3.43
LP 14	0.256	3.61	0.256	3.45
LP 15	0.243	3.58	0.243	3.38
LP 16	0.253	3.64	0.253	3.43
LP 17	0.243	3.59	0.243	3.38
LP 18	0.243	3.58	0.243	3.38
LP 19	0.256	3.65	0.256	3.45
LP 20	0.256	3.65	0.256	3.45
LP 21	0.253	3.59	0.253	3.43
LP 22	0.256	3.61	0.256	3.45

Continuação da Tabela 6.15

Observa-se uma grande semelhança entre os resultados para frequência de falha. As discrepâncias nas indisponibilidades devem-se provavelmente a formas diferentes de cálculo das durações das falhas, mas os resultados apresentam a mesma ordem de grandeza.

Pela tabela 6.15 observa-se que a maioria dos pontos de carga (vinte dentre vinte e dois) apresentam frequências de falha na faixa de 0.240 a 0.256 falhas por ano. Essa grande uniformidade deve-se possivelmente ao fato de se tratar de um sistema desenvolvido com propósitos educacionais, ou um sistema projetado (otimizado) de modo a possuir uma uniformidade de desempenho, ou ainda devido às simplificações efetuadas (componentes 100% confiáveis).

Essa uniformidade também se manifesta no cálculo dos índices com a consideração de incertezas nos dados. Aplicando a metodologia aos pontos de carga do Sistema 3, obtém-se, para a maioria dos pontos, coeficientes de variação ($\sigma/E\{\}$) da ordem de 8.5% para frequência de falha, e de 19% para indisponibilidade total.

A exceção é constituída pelos pontos LP8 e LP9, com frequência de falha de 0.140 falhas por ano, e 12.3% de coeficiente de variação para o mesmo caso anterior. O menor valor da

taxa de falha é causado pela inexistência do transformador de distribuição (11/0.415 kV) nos ramos que alimentam os dois pontos de carga em questão, e que estão presentes em todos os outros. Esse transformador é um componente a mais que pode falhar e interromper o fornecimento, assim, a sua inexistência nos ramos ligados aos pontos LP8 e LP9 reduz suas frequências de falha.

Como a maioria dos resultados é semelhante, optou-se por apresentá-los para dois pontos de carga, e para o sistema como um todo, nas tabelas 6.16 a 6.21. Ressalte-se que não há manutenção programada, e que os coeficientes de variação percentuais das taxas de falha e reparo dos componentes são f e r , respectivamente.

Incertezas (%)	E{Ff} (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Ff (f/ano)	
				Inferior	Superior
$f=15, r=0$	0.1400E+00	0.1719E-01	12.3	0.8565E-01	0.1944E+00
$f=0, r=15$	0.1400E+00	0.6883E-06	0.0	0.1400E+00	0.1400E+00
$f=15, r=15$	0.1400E+00	0.1719E-01	12.3	0.8565E-01	0.1944E+00
$f=30, r=0$	0.1400E+00	0.3439E-01	24.6	0.3128E-01	0.2487E+00
$f=0, r=30$	0.1400E+00	0.1377E-05	0.0	0.1400E+00	0.1400E+00
$f=30, r=30$	0.1400E+00	0.3439E-01	24.6	0.3128E-01	0.2487E+00

Tabela 6.16 - LP8- frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Uf} (h/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (h/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Uf (h/ano)	
				Inferior	Superior
$f=15, r=0$	0.3480E+00	0.4839E-01	13.9	0.1950E+00	0.5010E+00
$f=0, r=15$	0.3559E+00	0.4839E-01	13.6	0.2028E+00	0.5089E+00
$f=15, r=15$	0.3559E+00	0.6844E-01	19.2	0.1395E+00	0.5722E+00
$f=30, r=0$	0.3480E+00	0.9678E-01	27.8	0.4200E-01	0.6540E+00
$f=0, r=30$	0.3794E+00	0.9678E-01	25.5	0.7333E-01	0.6854E+00
$f=30, r=30$	0.3794E+00	0.1369E+00	36.1	0.0	0.8121E+00

Tabela 6.17 - LP8- indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Ff} (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Ff (f/ano)	
				Inferior	Superior
f=15, r=0	0.2560E+00	0.2237E-01	8.7	0.1853E+00	0.3268E+00
f=0, r=15	0.2560E+00	0.1401E-05	0.0	0.2560E+00	0.2560E+00
f=15, r=15	0.2560E+00	0.2237E-01	8.7	0.1853E+00	0.3268E+00
f=30, r=0	0.2560E+00	0.4474E-01	17.5	0.1146E+00	0.3975E+00
f=0, r=30	0.2560E+00	0.2801E-05	0.0	0.2560E+00	0.2560E+00
f=30, r=30	0.2560E+00	0.4474E-01	17.5	0.1146E+00	0.3975E+00

Tabela 6.18- LP14- frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Uf} (h/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (h/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Uf (h/ano)	
				Inferior	Superior
f=15, r=0	0.3449E+01	0.4656E+00	13.5	0.1977E+01	0.4921E+01
f=0, r=15	0.3527E+01	0.4656E+00	13.2	0.2054E+01	0.4999E+01
f=15, r=15	0.3527E+01	0.6585E+00	18.7	0.1444E+01	0.5609E+01
f=30, r=0	0.3449E+01	0.9313E+00	27.0	0.5043E+00	0.6394E+01
f=0, r=30	0.3759E+01	0.9313E+00	24.8	0.8146E+00	0.6704E+01
f=30, r=30	0.3759E+01	0.1317E+01	35.0	0.0	0.7924E+01

Tabela 6.19- LP14- indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Ff} (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var.(%)	Limites de Ff (f/ano)	
				Inferior	Superior
f=15, r=0	0.1350E+01	0.3526E-01	2.6	0.1239E+01	0.1462E+01
f=0, r=15	0.1350E+01	0.3972E-05	0.0	0.1350E+01	0.1350E+01
f=15, r=15	0.1350E+01	0.3526E-01	2.6	0.1239E+01	0.1462E+01
f=30, r=0	0.1350E+01	0.7052E-01	5.2	0.1127E+01	0.1573E+01
f=0, r=30	0.1350E+01	0.7944E-05	0.0	0.1350E+01	0.1350E+01
f=30, r=30	0.1350E+01	0.7052E-01	5.2	0.1127E+01	0.1573E+01

Tabela 6.20 - Sistema 3- frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Uf} (h/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (h/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Uf (h/ano)	
				Inferior	Superior
f=15, r=0	0.6525E+02	0.2018E+01	3.1	0.5887E+02	0.7163E+02
f=0, r=15	0.6672E+02	0.2018E+01	3.0	0.6034E+02	0.7310E+02
f=15, r=15	0.6672E+02	0.2854E+01	4.3	0.5769E+02	0.7574E+02
f=30, r=0	0.6525E+02	0.4036E+01	6.2	0.5248E+02	0.7801E+02
f=0, r=30	0.7112E+02	0.4036E+01	5.7	0.5835E+02	0.8388E+02
f=30, r=30	0.7112E+02	0.5708E+01	8.0	0.5306E+02	0.8916E+02

Tabela 6.21- Sistema 3- indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

6.3.3.2 - Observações

São identificados quatro caminhos mínimos por ponto de carga, e em média quatro cortes mínimos por falhas ativas de primeira ordem, e dois cortes mínimos por falhas passivas de primeira ordem (nos pontos LP8 e LP9 são dois cortes por falhas ativas e um por falha passiva de primeira ordem). Há então, novamente, um predomínio das contribuições por falhas ativas.

Os coeficientes de variação das frequências de falha são sempre menores do que os dos dados, para todos os pontos de falha, e para o sistema. Já os coeficientes de variação das indisponibilidades totais são maiores do que os dos dados.

Os coeficientes de variação do sistema, como no Sistema 2, são menores do que os dos pontos de carga, por considerarem apenas as falhas passivas.

A consideração de um determinado coeficiente de variação para os dados não implica que os resultados terão coeficiente de variação semelhante. É necessária a aplicação da metodologia CSTDI ao sistema para se obter o coeficiente de variação dos índices de confiabilidade. Observa-se, novamente, que duplicando-se o coeficiente de variação dos dados, duplicam-se os desvios padrões dos índices de confiabilidade (e por conseguinte seus coeficientes de variação).

6.3.3.3 - Particularidades do Sistema 3

Trata-se de um sistema radial com recursos (dois componentes N.A.), com mais de cem componentes, e vinte e dois pontos de carga. Aplicando a metodologia CSTDI, pode-se identificar os disjuntores (ou componentes N.A.) que isolam as falhas ativas em cada caminho mínimo entre fonte e cada ponto de carga. Dado o grande número de pontos, optou-se por apresentar os resultados para apenas dois: LP1, mais próximo do ponto fonte, e LP15, mais distante (ver figura 6.3), nas tabelas 6.24 a 6.26.

Ponto	Cam. min.	Elementos
LP1	1	50, 2, 49, 48, 1, 44, 43, 41, 39, 38, 37
	2	50, 2, 49, 53, 4, 54, 59, 7, 60, 65, 10, 66, 73, 71, 14, 70, 12, 45, 43, 41, 39, 38, 37
	3	50, 2, 49, 48, 1, 44, 43, 42, 38, 37
	4	50, 2, 49, 53, 4, 54, 59, 7, 60, 65, 10, 66, 73, 71, 14, 70, 12, 45, 43, 42, 40, 38, 37
LP15	1	94, 27, 93, 92, 26, 47, 43, 41, 39, 38, 37
	2	94, 27, 93, 97, 29, 98, 103, 32, 104, 107, 34, 108, 113, 89, 24, 88, 83, 21, 82, 77, 18, 76, 16, 46, 43, 41, 39, 38, 37
	3	94, 27, 93, 92, 26, 47, 43, 42, 40, 38, 37
	4	94, 27, 93, 97, 29, 98, 103, 32, 104, 107, 34, 108, 113, 89, 24, 88, 83, 21, 82, 77, 18, 76, 16, 46, 43, 42, 40, 38, 37

Tabela 6.22 - Caminhos mínimos dos pontos de carga LP1 e LP15 do Sistema 3.

Os demais componentes que interrompem o fornecimento aos pontos LP1 e LP15 do Sistema 3, no modo falhas ativas, são apresentados no Apêndice D.

Como os disjuntores e fusíveis são 100% confiáveis, não há falhas ativas conjugadas a disjuntor preso. Os componentes 73 e 113 são N.A. (N.A.), atuam como disjuntores nos caminhos mínimos que os contém.

Os tempos de processamento para o Sistema 3 são em torno de 6 minutos e 52 segundos. Esse acréscimo considerável em relação aos sistemas anteriores deve-se ao maior número de componentes e principalmente ao maior número de pontos de carga (22 contra 3 do Sistema

2, e apenas 1 do Sistema 1). Todo o processo de identificação de cortes mínimos têm que ser repetido para os vinte e dois pontos de carga.

6.3.4 - Sistema 4- sistema de distribuição ligado à barra 4 do sistema RBTS-IEEE [45]

O Sistema 4 é um sistema de distribuição ligado à barra 4 do RBTS [44-45] (o Sistema 3 é ligado à barra 2 do RBTS). Trata-se de um sistema radial com recursos de chaveamento de cinco componentes N.A., além de três barramentos primários de alimentação (em 33kV), mas apenas um ponto fonte. Apresenta trinta e oito pontos de carga, sendo assim consideravelmente mais complexo que o Sistema 3. O grafo do sistema é apresentado na figura 6.4.

Esclarecimentos sobre a figura 6.4.

- os componentes de número 002, 006, 010, 014, 017, 021, 025, 028, 030, 034, 038, 041, 043, 046, 049, 051, 055, 058, 061, 064, e 067 são linhas de 0.6 km de extensão.
- os componentes 001, 004, 007, 009, 012, 016, 019, 022, 024, 027, 029, 032, 035, 037, 040, 042, 045, 048, 050, 053, 056, 060, 063, e 065 são linhas de 0.75 km de extensão.
- os componentes 003, 005, 008, 011, 013, 015, 018, 020, 023, 026, 031, 033, 036, 039, 044, 047, 052, 054, 057, 059, 062, e 066 são linhas de 0.8 km de extensão.
- os componentes 068, 206, 207, 208, 209, 210, e 211 são disjuntores de 33 kV.
- os componentes 072, 073, 075, 099, 106, 133, 134, 136, 162, 173, 174, 176 e 182 são disjuntores de 11 kV.
- a simbologia utilizada na figura 6.4 não é a adotada pela ABNT.
- os componentes 070, 071, 131, 132, 171, 172 são transformadores de 33/11 kV.

Para a aplicação da metodologia CSTDI ao Sistema 4, de modo a permitir a comparação dos resultados com a referência [45], adotaram-se as mesmas simplificações feitas para o

Sistema 3 (ver seção 6.3.3). Os dados dos componentes do Sistema 4 são os mesmos que os do Sistema 3, mostrados na tabela 6.14.

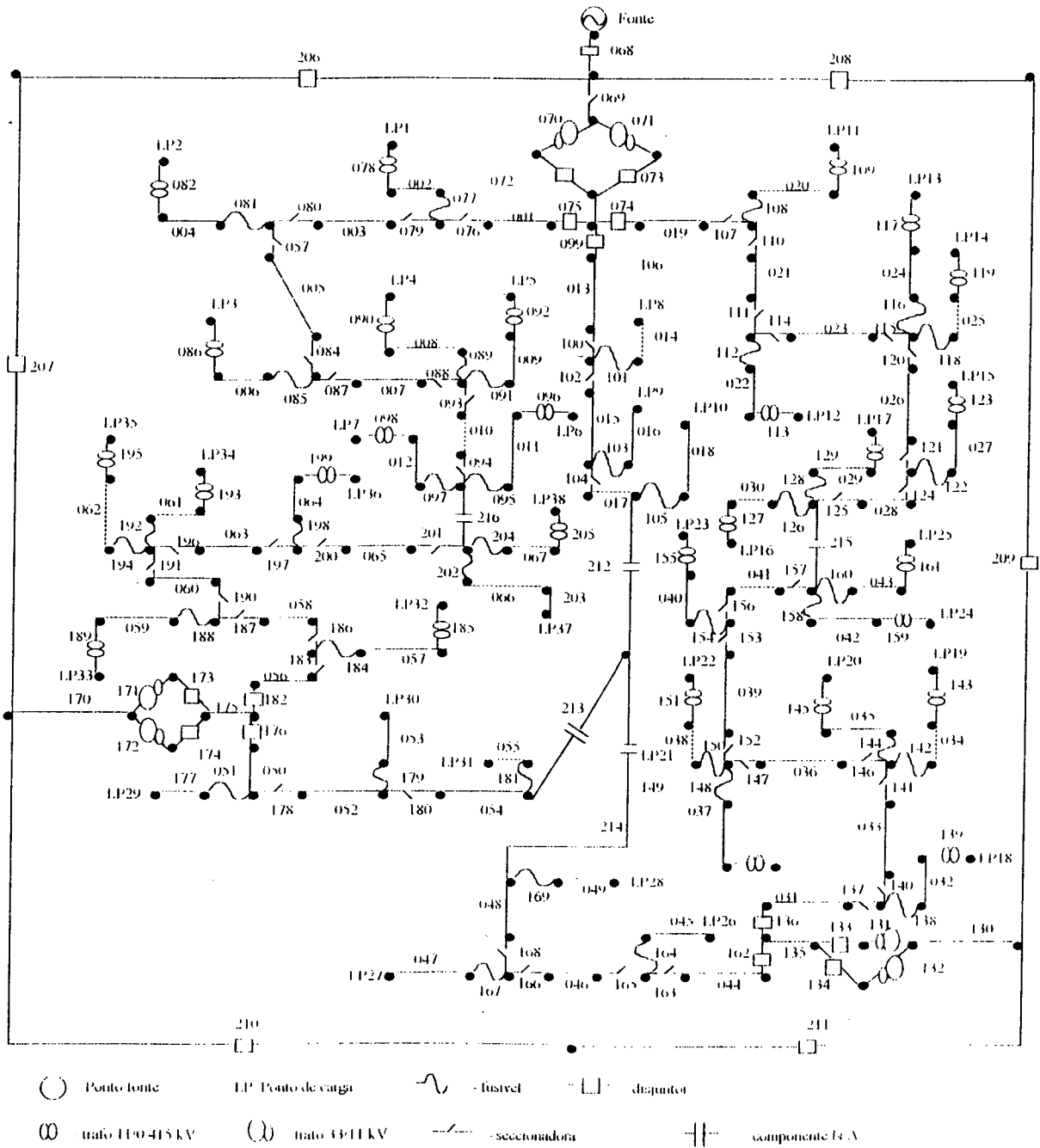


Figura 6.4- Sistema 4- Sistema radial de distribuição com 38 pontos de carga e 216 componentes

6.3.4.1 - Resultados da aplicação da metodologia CSTDI ao Sistema 4

Da mesma forma que no Sistema 3 apresenta-se na tabela 6.27 a comparação entre os índices de confiabilidade calculados sem a consideração de incertezas pela referência [45] e pela metodologia CSTDI (Ff é frequência de falha, Uf é indisponibilidade total).

Ponto de carga	Referência [45]		Metodologia CSTDI	
	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)
LP1	0.295	3.44	0.295	3.44
LP2	0.305	3.49	0.305	3.49
LP3	0.295	3.44	0.295	3.44
LP4	0.308	3.50	0.308	3.50
LP5	0.305	3.49	0.305	3.48
LP6	0.308	3.50	0.308	3.50
LP7	0.305	3.49	0.305	3.48
LP8	0.182	0.34	0.182	0.34
LP9	0.192	0.39	0.192	0.39
LP10	0.195	0.40	0.192	0.39
LP11	0.298	3.49	0.298	3.49
LP12	0.295	3.48	0.295	3.48
LP13	0.295	3.48	0.295	3.48
LP14	0.285	3.43	0.285	3.43
LP15	0.295	3.48	0.295	3.48
LP16	0.285	3.43	0.285	3.43
LP17	0.295	3.48	0.295	3.48
LP18	0.311	3.49	0.311	3.49
LP19	0.301	3.44	0.301	3.44
LP20	0.311	3.49	0.311	3.49
LP21	0.311	3.49	0.311	3.49
LP22	0.301	3.44	0.301	3.44
LP23	0.311	3.49	0.311	3.49
LP24	0.311	3.49	0.311	3.49
LP25	0.301	3.44	0.301	3.44
LP26	0.189	0.39	0.189	0.38
LP27	0.192	0.40	0.192	0.40
LP28	0.179	0.34	0.179	0.34
LP29	0.192	0.35	0.192	0.35
LP30	0.202	0.40	0.202	0.40
LP31	0.192	0.35	0.192	0.35

Tabela 6.23 - Índices de confiabilidade sem consideração de incertezas para os pontos de carga do Sistema 4.

Ponto de carga	Referência [45]		Metodologia CSTD	
	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)	Ff (f/ano)	Uf (h/ano)
LP32	0.302	3.50	0.302	3.50
LP33	0.302	3.50	0.302	3.50
LP34	0.289	3.43	0.289	3.43
LP35	0.302	3.50	0.302	3.50
LP36	0.289	3.43	0.289	3.43
LP37	0.302	3.50	0.302	3.50
LP38	0.289	3.43	0.289	3.43

Continuação da tabela 6.23

Novamente há uma grande coincidência dos resultados para os pontos de carga, inclusive para indisponibilidades totais.

Pode-se aplicar ao Sistema 4 raciocínio semelhante ao que foi aplicado ao Sistema 3. A maioria dos pontos de carga apresentam frequências de falha variando de 0.285 a 0.311 falhas por ano, com coeficientes de variação ($\sigma/E\{f\}$) da ordem de 7.6%. Os demais pontos apresentam frequências de falha menores pelo mesmo motivo do Sistema 3: a inexistência de transformadores de distribuição (11/0.415 kV) nos ramos que alimentam estes pontos de carga.

Devido à semelhança dos resultados, optou-se por apresentá-los para dois pontos de carga e para o sistema como um todo, nas tabelas 6.24 a 6.29 (onde que f e r são os coeficientes de variação (graus de incertezas) das taxas de falha e reparo dos componentes, respectivamente).

Incertezas (%)	$E\{Ff\}$ (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Ff (f/ano)	
				Inferior	Superior
$f=15, r=0$	0.1820E+00	0.1834E-01	10.1	0.1240E+00	0.2400E+00
$f=0, r=15$	0.1820E+00	0.4999E-01	0.0	0.1820E+00	0.1820E+00
$f=15, r=15$	0.1820E+00	0.1834E-01	10.1	0.1240E+00	0.2400E+00
$f=30, r=0$	0.1820E+00	0.3667E-01	20.2	0.6605E-01	0.2980E+00
$f=0, r=30$	0.1820E+00	0.9998E-06	0.0	0.1820E+00	0.1820E+00
$f=30, r=30$	0.1820E+00	0.3667E-01	20.2	0.6605E-01	0.2980E+00

Tabela 6.24 - LP8- frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Uf} (f/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Uf	
				Inferior	Superior
f=15, r=0	0.3380E+00	0.4173E-01	12.4	0.2060E+00	0.4700E+00
f=0, r=15	0.3456E+00	0.4173E-01	12.1	0.2136E+00	0.4776E+00
f=15, r=15	0.3456E+00	0.5902E-01	17.1	0.1590E+00	0.5322E+00
f=30, r=0	0.3380E+00	0.8347E-01	24.7	0.7408E-01	0.6019E+00
f=0, r=30	0.3684E+00	0.8347E-01	22.7	0.1045E+00	0.6324E+00
f=30, r=30	0.3684E+00	0.1180E+00	32.0	0.0	0.7417E+00

Tabela 6.25 - LP8- indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Ff} (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Ff (f/ano)	
				Inferior	Superior
f=15, r=0	0.3109E+00	0.2432E-01	7.8	0.2340E+00	0.3878E+00
f=0, r=15	0.3109E+00	0.1706E-05	0.0	0.3109E+00	0.3109E+00
f=15, r=15	0.3109E+00	0.2432E-01	7.8	0.2340E+00	0.3878E+00
f=30, r=0	0.3109E+00	0.4864E-01	15.6	0.1571E+00	0.4646E+00
f=0, r=30	0.3109E+00	0.3413E-05	0.0	0.3109E+00	0.3109E+00
f=30, r=30	0.3109E+00	0.4864E-01	15.6	0.1571E+00	0.4646E+00

Tabela 6.26 - LP23- frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	E{Uf} (f/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Uf (h/ano)	
				Inferior	Superior
f=15, r=0	0.3491E+01	0.4678E+00	13.4	0.2012E+01	0.4970E+01
f=0, r=15	0.3570E+01	0.4678E+00	13.1	0.2090E+01	0.5049E+01
f=15, r=15	0.3570E+01	0.6612E+00	18.5	0.1478E+01	0.5662E+01
f=30, r=0	0.3491E+01	0.9357E+00	26.8	0.5324E+00	0.6450E+01
f=0, r=30	0.3805E+01	0.9357E+00	24.6	0.8465E+00	0.6764E+01
f=30, r=30	0.3805E+01	0.1323E+01	34.8	0.0	0.7989E+01

Tabela 6.27 - LP23- indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	$E\{Ff\}$ (f/ano)	$\sigma\{Ff\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Ff (f/ano)	
				Inferior	Superior
$f=15, r=0$	0.2181E+01	0.4446E-01	2.0	0.2041E+01	0.2322E+01
$f=0, r=15$	0.2181E+01	0.5117E-05	0.0	0.2181E+01	0.2181E+01
$f=15, r=15$	0.2181E+01	0.4446E-01	2.0	0.2041E+01	0.2181E+01
$f=30, r=0$	0.2181E+01	0.8892E-01	4.1	0.1900E+01	0.2462E+01
$f=0, r=30$	0.2181E+01	0.1023E-04	0.0	0.2181E+01	0.2181E+01
$f=30, r=30$	0.2181E+01	0.8892E-01	4.1	0.1900E+01	0.2462E+01

Tabela 6.28 - Sistema 4- frequência de falha: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

Incertezas (%)	$E\{Uf\}$ (f/ano)	$\sigma\{Uf\}$ (f/ano)	Coef. Var. (%)	Limites de Uf (h/ano)	
				Inferior	Superior
$f=15, r=0$	0.9573E+02	0.2431E+01	2.5	0.8804E+02	0.1034E+03
$f=0, r=15$	0.9788E+02	0.2431E+01	2.5	0.9020E+02	0.1056E+03
$f=15, r=15$	0.9788E+02	0.3438E+01	3.5	0.8701E+02	0.1088E+03
$f=30, r=0$	0.9573E+02	0.4862E+01	5.1	0.8035E+02	0.1111E+03
$f=0, r=30$	0.1043E+03	0.4862E+01	4.7	0.8896E+02	0.1197E+03
$f=30, r=30$	0.1043E+03	0.6876E+01	6.6	0.8259E+02	0.1261E+03

Tabela 6.29 - Sistema 4- indisponibilidade total: valor esperado, desvio-padrão, coeficiente de variação, e limites de confiança para 90%.

6.3.4.2 - Particularidades do Sistema 4

São identificados trinta e quatro caminhos mínimos por ponto de carga, e em média dois cortes mínimos por falhas passivas de primeira ordem, e cinco cortes mínimos por falhas ativas de primeira ordem. Observa-se o predomínio das contribuições por falhas ativas.

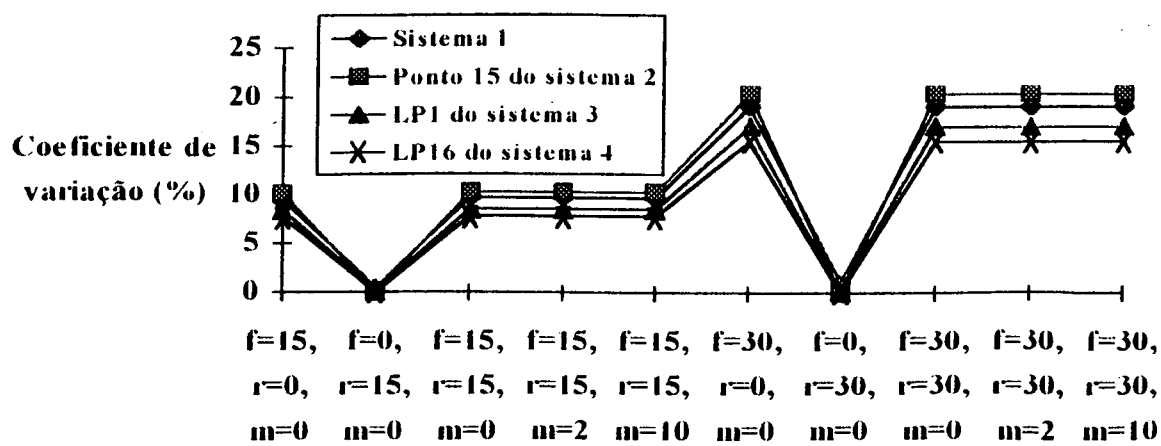
O comportamento dos coeficientes de variação dos índices de confiabilidade é semelhante ao do Sistema 3.

Não obstante a sua complexidade, embora inferior à sistemas reais de distribuição, o Sistema 4 pode ser visto como um sistema radial. Assim sendo, as alterações propostas na seção 5.5 para análise de sistemas radiais devem ser aplicadas ao Sistema 4. Contudo, devido ao grande número de pontos de carga (trinta e oito), número de caminhos mínimos por ponto (cerca de trinta e quatro), com até noventa elementos por caninho mínimo, seria improdutivo apresentá-los. Observações semelhantes porém, às obtidas para o Sistema 3 podem ser feitas para o Sistema 4.

Devido a esta complexidade, o tempo de processamento sofreu um considerável acréscimo em relação ao Sistema 3: passou a ser da ordem de duas horas e catorze minutos. O Sistema 4 tem dezesseis pontos de carga a mais do que o Sistema 3, e cada ponto de carga passa a ter trinta e quatro, ao invés de quatro, caminhos mínimos.

6.4 - CONCLUSÃO

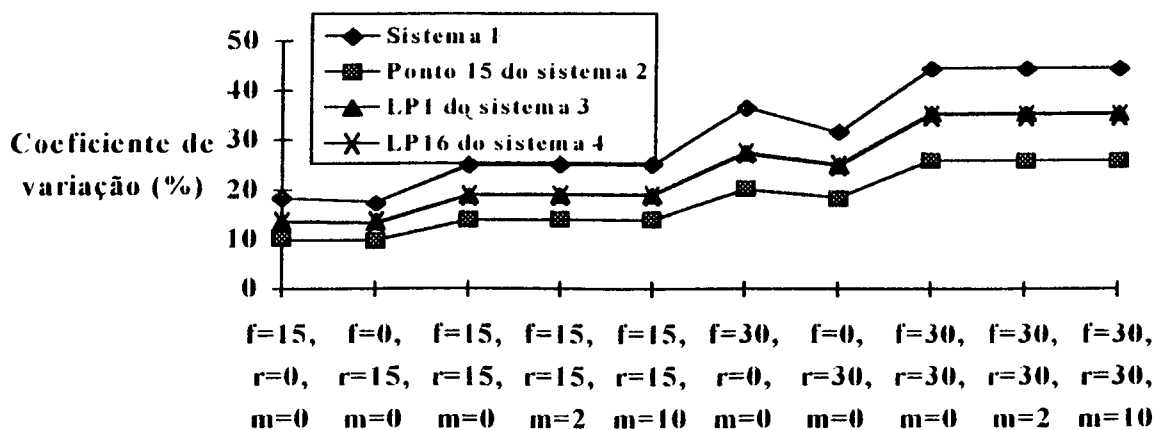
Apresenta-se a seguir uma série de gráficos comparando os resultados obtidos para pontos típicos de cada sistema, em termos de coeficiente de variação percentual da frequência de falha e indisponibilidade total para cada caso da tabela 6.1, nas figuras 6.5 a 6.8.



Coeficientes de variação percentuais:

f- taxas de falha, r- taxas de reparo, m- taxas de manutenção

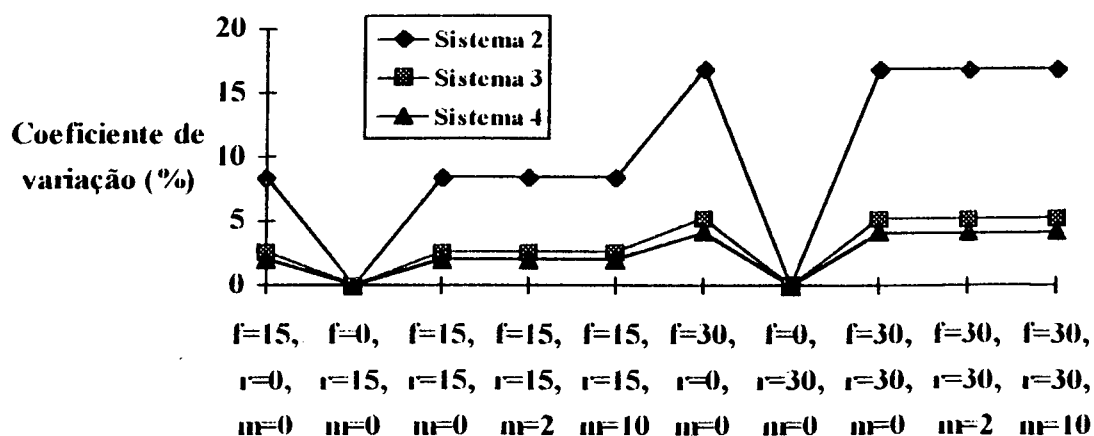
Figura 6.5 - Coeficiente de Variação para frequência de falha para pontos típicos dos sistemas 1, 2, 3 e 4.



Coefficientes de variação percentuais:
 f- taxas de falha, r- taxas de reparo, m- taxas de manutenção

Figura 6.6 - Coeficiente de Variação para indisponibilidade total para pontos típicos dos sistemas 1, 2, 3 e 4.

Observe-se que ao duplicar-se o coeficiente de variação dos dados, obtém-se o mesmo comportamento dos coeficientes dos índices. Esse desempenho pode ser observado também nas figuras 6.7 e 6.8, para os coeficientes de variação dos índices de confiabilidade para os sistemas 2, 3 e 4 (o Sistema 1 tem somente um ponto de carga, sendo então excluído desta análise).



Coefficientes de variação percentuais:
 f- taxas de falha, r- taxas de reparo, m- taxas de manutenção

Figura 6.7 - Coeficiente de Variação para frequência de falha dos sistemas 2, 3 e 4.

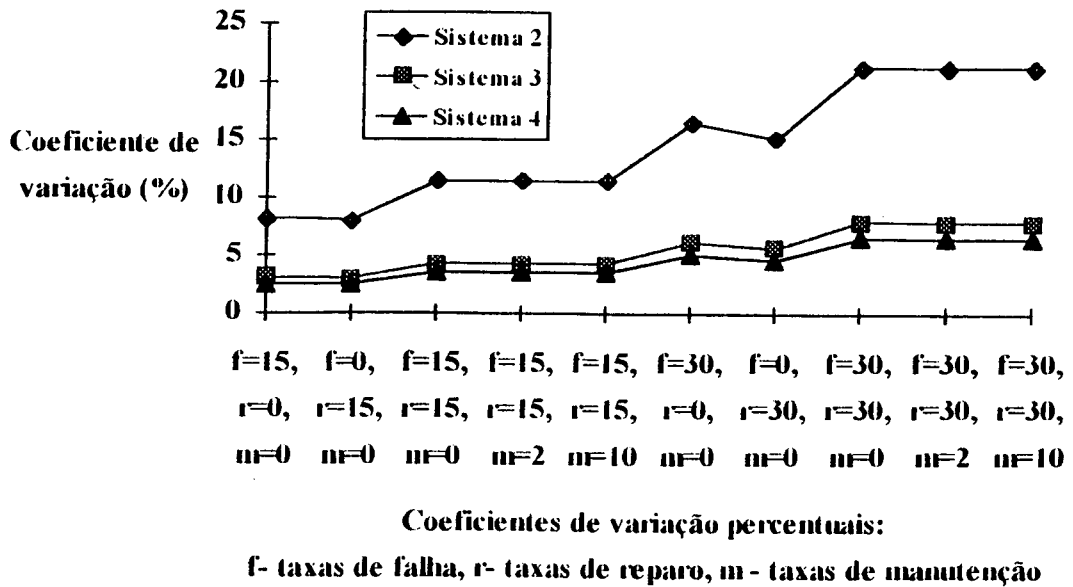


Figura 6.8 - Coeficiente de Variação para indisponibilidades totais dos sistemas 2, 3 e 4.

Pelas figuras 6.5 a 6.8 observa-se (reiterando as afirmações anteriores) que um determinado valor assumido para os coeficientes de variação das taxas dos componentes não implica que os coeficientes de variação dos índices de confiabilidade terão o mesmo valor.

A pequena quantidade de sistemas testados torna temerária qualquer generalização sobre os possíveis valores dos índices de confiabilidade, e seus coeficientes de variação. Percebe-se porém, que em geral os coeficientes de variação da frequência de falha diferem mais dos coeficientes dos dados (são geralmente menores), e os coeficientes das indisponibilidades totais aproximam-se mais (e geralmente são maiores do que os coeficientes de variação dos dados, exceto para o Sistema 2).

Os resultados mostraram que a consideração de incertezas na manutenção programada (sistemas 1 e 2) pouco efeito terá sobre os índices de confiabilidade (em seus valores esperados e variâncias). Pode-se concluir que a desconsideração das incertezas na manutenção programada não invalidará futuros estudos (o que é reforçado pelo fato de que geralmente os dados sobre a manutenção programada são mais confiáveis do que os relacionados às falhas). Não se deve esquecer, porém, de que isso ocorre porque as hipóteses

simplificadoras do modelo desconsideram manutenção programada como falha de primeira ordem.

As conclusões de Endrenyi [4] sobre o maior valor das contribuições dos cortes mínimos de segunda ordem envolvendo manutenção programada, frente às falhas simultâneas de dois componentes, também foram evidenciadas neste capítulo.

A metodologia CSTDI, a partir da existência nas taxas de falha e de reparo dos componentes de um sistema, obtém limites de confiança conservativos para os índices de confiabilidade deste sistema, através da Desigualdade de Chebyshev, sem a necessidade do conhecimento da função de densidade de probabilidade seguida pelos índices, obtendo resultados conservativos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi descrever uma metodologia para avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão e distribuição, considerando a existência de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo dos componentes. Optou-se pelo desenvolvimento de uma técnica analítica, e que considerasse como dados de entrada os valores esperados e variâncias, ou desvios padrões, das taxas de falha e reparo dos componentes de um sistema.

No capítulo 2 foi feita uma revisão das técnicas de avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão e distribuição, e de tratamento de incertezas nos dados. Analisou-se a praticidade de muitas dessas técnicas, e a possibilidade de conjunção de metodologias de avaliação de confiabilidade e tratamento de incertezas. Muitas das quais apresentam aproximações semelhantes, como independência entre taxas de falha e reparo, tempos de operação muito maiores do que os tempos de falha, sistema em estado estacionário, etc, e o mesmo método de identificação de contingências (cortes mínimos).

Das metodologias de avaliação da confiabilidade (sem a consideração de incertezas), o capítulo 3 descreveu em pormenores a metodologia CST (Confiabilidade de Sistemas de Transmissão, [11]). Esta técnica representa com elevado grau de realismo os eventos que afetam a confiabilidade de um sistema: considera a atuação dos equipamentos de proteção (inclusive os casos em que não operam quando chamados a tal), influência da manutenção, chaveamento de componentes normalmente abertos, etc. O uso da técnica dos cortes mínimos para identificação das contingências que interrompem o fornecimento permite uma avaliação rápida de vários sistemas, recomendando o uso da metodologia em estudos de planejamento.

No capítulo 4 descrevem-se as metodologias de tratamento de incertezas nos dados que mais se adequavam aos objetivos deste trabalho. Escolheu-se a metodologia de González-Urdaneta & Cory (GU&C [19]), devido à consideração das incertezas das taxas dos

componentes como dados de entrada, semelhança entre suas hipóteses e a metodologia CST, determinação de intervalos de confiança para os índices sem a necessidade de conhecer suas funções densidade de probabilidade (pdf's), e também devido à natureza conservativa dos resultados encontrados.

A metodologia CSTDI- Confiabilidade de Sistemas de Transmissão e Distribuição com a consideração de Incertezas nos dados é descrita no capítulo 5. Trata-se da conjunção das duas técnicas apresentadas nos capítulos 3 e 4, com as adaptações necessárias para vários modos de falha, para sistemas de distribuição, etc. São calculados o valor esperado e a variância para os índices frequência de falha e indisponibilidade total, possibilitando a determinação dos intervalos de confiança para estes índices, e foi modificada a identificação dos cortes por atuação da proteção, em sistemas de distribuição.

Os resultados da aplicação da metodologia CSTDI a vários sistemas foram apresentados no capítulo 6. Constatou-se que:

- 1)- as contribuições dos cortes mínimos que envolvem manutenção são maiores do que as dos cortes que envolvem falhas simultâneas, devido ao maior valor das taxas de manutenção, em relação às taxas de falha.
- 2)- a variância da frequência de falha é fortemente influenciada pela variância das taxas de falha dos componentes, como já era esperado.
- 3)- a variância da indisponibilidade total não se apresenta atrelada a apenas um dos tipos de taxas dos componentes, é influenciada tanto pela variância das taxas de falha quanto das de reparo.
- 4)- a adoção de um coeficiente de variação para os dados não implica que os coeficientes de variação dos índices de confiabilidade assumirão o mesmo valor percentual; a priori, não se pode prever qual será a variância destes índices (além do que foi dito no capítulo 6),

justificando plenamente a aplicação da metodologia CSTDI. Porém, o ato de duplicar a variância das taxas de falha e/ou reparo dos componentes, causa, igualmente, duplicação das variâncias dos índices de confiabilidade.

As contribuições principais do trabalho foram as seguintes:

- 1- estudo das várias metodologias de avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão e distribuição publicadas nos últimos anos.
- 2- estudo das várias metodologias de tratamento de incertezas nos dados, para avaliação da confiabilidade de sistemas.
- 3- agregação da metodologia CST (Confiabilidade de Sistemas de Transmissão), com a metodologia de tratamento de incertezas nos dados de falha e reparo, para constituir a metodologia CSTDI, sendo necessário para tal:
 - 3.1- estudo sobre a extensão da metodologia GU&C para vários modos de falha e para vários pontos de carga.
 - 3.2- adaptação da metodologia CST para sistemas de distribuição, com a elaboração de um algoritmo para identificação de falhas por atuação da proteção para sistemas radiais.
- 4- obteve-se uma metodologia flexível e suficientemente realista para a realização de estudos de planejamento, permitindo a comparação de diversas alternativas de sistemas, quer sejam de transmissão, distribuição ou subestações.
- 5- com a determinação dos limites de confiança para os índices de confiabilidade, sem a necessidade de identificação das suas funções densidade de probabilidade, os profissionais da área dispõem de maiores subsídios para estudos de planejamento de sistemas de distribuição.
- 6- aplicação da metodologia a sistemas existentes, com configurações diferentes, mostrando a sua versatilidade.

7- a consideração de incertezas nos dados permite incluir os efeitos das condições climáticas (tempo normal/ tempo adverso), sem a necessidade de modelagem adicional.

Como sugestões para futuros trabalhos apresentam-se

- incluir na metodologia CSTDI considerações sobre qualidade de suprimento (carregamento dos circuitos e níveis de tensão).
- acrescentar modelagem de falhas de modo comum à metodologia.
- utilizar a metodologia CSTDI para estudos de alocação de equipamentos de proteção em redes de distribuição.
- estender a metodologia para outros índices como duração média da falha, e energia média não suprida.
- fazer a junção da metodologia CSTDI com uma técnica de avaliação da confiabilidade de geração com incertezas, objetivando a elaboração de uma metodologia de avaliação da confiabilidade composta geração/transmissão.
- agregar à metodologia CSTDI considerações sobre custos de interrupção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- TODD Z.G.- "A probability method for transmission and distribution outage calculations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-83, July 1964, pp. 695-701.
- 2- GAVER D.P., MONTMEAT F.E., PATTON A.D.- "Power system reliability I: measure of reliability and methods of calculation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-83, July 1964, pp. 727-737.
- 3- RINGLEE R.J., & GOODE S.D.- "On procedures for reliability evaluation of transmission systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 4, April 1970, pp. 527-536.
- 4- ENDRENYI J.- "Three-state models in power systems reliability evaluations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, no. 4, July/August 1971, pp. 1909-1916.
- 5- BILLINTON R. & GROVER M.S.- "Quantitative evaluation of permanent outages in distribution systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 3, May/June 1975, pp 733-742.
- 6- BILLINTON R. & GROVER M.S.- "Reliability evaluation in transmission and distribution systems", IEE Proceedings, vol. 122, no. 5, 1975, pp. 517-523.
- 7- BILLINTON R. & GROVER M.S.- "Reliability assessment of transmission and distribution schemes", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 3, May/June 1975, pp. 724-733.
- 8- GROVER M.S. & BILLINTON R.- "A computerized approach to substation and switching station reliability evaluation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 5, September/October 1974, pp. 1488-1497.
- 9 - KOVAL D.O. & BILLINTON R.- "Evaluation of distribution circuit reliability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 2, March/April 1979, pp. 509-518.
- 10- ALLAN R.N., DIALYNAS E.N., HOMER I.R. - "Modelling and evaluating the reliability of distribution systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, November/December 1979, pp. 2181-2188.

- 11- ELETROSUL, Departamento de Informática- Manual de programa de confiabilidade de sistemas de transmissão (CST), Florianópolis, SC, 1980, 100p.
- 12- SINGH C.- "Markov cut-set approach for the reliability evaluation of transmission and distribution systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 6, June 1981, pp.2719-2725.
- 13- BILLINTON R. & KUMAR Y.- "Transmission line reliability models including common mode and adverse weather effects", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 8, August 1981, pp. 3899-3910.
- 14- BILLINTON R. & WOJCZYNSKI E.- "Distributional variation of distribution system reliability indices", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 11, November 1985, pp. 3152-3160.
- 15- OLIVEIRA M.A.C.- "Confiabilidade de sistemas de distribuição-comparação de metodologias", UFSC, Florianópolis, SC, 1986, Tese de Mestrado.
- 16- SALLAM A.A., DESOUKY M., DESOUKY H.- "Evaluation of optimal-reliability indices for electrical distribution systems", IEEE Transactions on Reliability, vol. 39, no. 3, August 1990, pp. 259-264.
- 17- FONG C.C. & GRIGG C.H.- "Transmission outage models for sub-transmission network reliability evaluation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 2, May 1991, pp. 605-611.
- 18- THOMPSON M.- "Lower confidence limits and a test of hypotheses for system availability", IEEE Transactions on Reliability, vol. R-15, no. 1, May 1966, pp. 32-36.
- 19- GONZÁLEZ-URDANETA G.E. & CORY B.J.- "Variance and approximate confidence limits for probability and frequency of system failure", IEEE Transactions on Reliability, vol. R-27, no. 4, October 1978, pp. 289-293.
- 20- PATTON A.D.- "Probability distribution of transmission and distribution reliability performance indices", Reliability Conference for the Electric Power Industry, April 1979, pp. 120-123.
- 21- BILLINTON R. & GOEL R.- "An analytical approach to evaluate probability distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-1, no. 3, July 1986, pp. 245-251.

- 22- WONG T.Y., TSAI D.T., FONG C.C. - "Reliability assessment in operational planning for subtransmission, station, and distribution systems", 2nd International Symposium, 1988.
- 23- LUZ A.L., "Planejamento de redes de distribuição", PUC, Rio de Janeiro, RJ, 1992, Tese de Mestrado.
- 24- CAMARGO C.C. de B., Confiabilidade aplicada a sistemas de potência, LTC-ELETROBRÁS-FEESC, 1981.
- 25- SILVA A.M.L. da, COELHO J., MELO A.C.G., "Uncertainty considerations in frequency and duration analysis for large hydrothermal generating systems", IEE Proceedings-C, vol.139, no.3, May 1992.
- 26- COELHO J., "Impacto da incerteza das taxas de falha e reparo dos geradores em estudos de confiabilidade", VII Congresso Brasileiro de Manutenção, Porto Alegre, RS, Setembro/Octubro de 1992.
- 27- BILLINTON R. & ALLAN R.N., Reliability evaluation of power systems, Pitman Advanced Publishing Program, 1984.
- 28- BILLINTON R. & ALLAN R.N., Reliability evaluation of engineering systems, Pitman Advanced Publishing Program, 1983.
- 29- COELHO J., "Confiabilidade da geração de sistemas de grande porte na presença de incertezas nos dados", PUC/RJ, 1990, Tese de doutorado.
- 30- CLARKE A.B. & DISNEY R.L., Probabilidade e processos estocásticos, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1979.
- 31- AU T., SHANE R.M., HOEL L.A., Fundamentals of systems engineering- probabilistic models, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1972.
- 32- BURY K.V., Statistical models in applied science, John Wiley & sons, New York, 1975.
- 33- DeGROOT M.H., Probability and statistics, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1975
- 34- VIOLIN A., FERNANDES J.H.M., KOSLOSKI R.A.D., "Reavaliação dos esquemas de manobras das subestações da ELETRONORTE", IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1987.
- 35- SPIEGEL M.R., Manual de fórmulas e tabelas matemáticas, McGraw-Hill, São Paulo, Brasil, 1973.

- 36- HAYS W.L. & WINKLER R.L., Statistics: probability, inference, and decision, vol. II , Holt, Rinehart and Winston, Inc, New York, 1970
- 37- SPIEGEL M.R., Probabilidade e estatística, McGraw-Hill, São Paulo, 1977.
- 38- ELETROBRÁS, Planejamento de sistemas de distribuição, Editora Campus, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1982.
- 39- COELHO J. & REIS M.M., "Índices de confiabilidade em sistemas de distribuição com incertezas nos dados - estudo de uma subestação", Ho. Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planeamento e Exploração em Redes de Distribuição- Ho. ELAB, Vol. No.2, Comunicação No.17, Cidade do Porto, Portugal, Março 1993.
- 40- ARIENTI V.L. & MELO A.C.G., "Confiabilidade de sistemas", Itaipu Binacional, curso.
- 41- NAHMAN J.M., "Minimal paths & cuts of networks exposed to common-cause failures", IEEE Transactions on Reliability, vol.1, no.1, March 1992.
- 42- MIRSHAWKA V., Probabilidades e estatística para engenharia, vol.1, Nobel, São Paulo, 1978.
- 43- PAPOULIS A., Probability, random variables and stochastic processes, McGraw-Hill, 1984.
- 44- BILLINTON R., KUMAR S., CHOWDHURY N., CHU K., DEBNATH K., GOEL L., KHAN E., KOS P., NOURBAKHSH G., OTENG-ADJEI J., "A Reliability Test System for Educational Purposes- Basic Data", IEEE Transactions on Power Systems, vol.4, No.3, August 1989.
- 45- ALLAN R.N., BILLINTON R., SJARIEF I., GOEL L., SO K.S., "A Reliability Test System for Educational Purposes- Basic Distribution System Data and Results", IEEE Transactions on Power Systems, vol.6, no.2, May 1991.
- 46- COELHO J. & REIS M.M., "Aplicação da Desigualdade de Chebyshev para cálculo de incertezas em sistemas de distribuição", X Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Valdivia, Chile, Novembro, 1993.

APÊNDICE A

METODOLOGIA CODI DE CÁLCULO DA CONFIABILIDADE ESPERADA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO [38]

O cálculo da confiabilidade esperada em um sistema é feito a partir do conhecimento prévio de determinados parâmetros de seus componentes, individualmente. Tais parâmetros são:

λ taxa de falhas do componente, em falha/unidades/ano, ou falhas/km/ano;

r tempo médio de restabelecimento do componente, em horas/falha.

Para cada componente que constitui o sistema analisado (rede de distribuição e equipamentos), verifica-se a equação (A.1) a seguir:

$$d = \lambda * r \quad (A.1)$$

Onde d é a contribuição de cada componente na duração total de interrupção do sistema analisado.

Os dados individuais dos componentes relativos às taxas de falhas (λ) e tempo médio de restabelecimento (r), obtidos através de um sistema apropriado de coleta de dados, constituem importantes indicadores do desempenho do sistema atual, e permitem também a determinação dos valores da confiabilidade esperada. Tais dados devem ser confrontados com as metas de qualidade de serviço previamente fixadas pela concessionária.

Valores incompatíveis com as metas determinam melhoramentos operacionais no sistema, seja através de uma programação mais adequada de manutenções preventivas, seja pela tentativa de redução das durações das interrupções, inserindo-se meios mais eficientes de comunicação e locomoção, ou, ainda, elaborando-se estudos de seccionamento e proteção da rede de distribuição e outros recursos do sistema.

Conforme será visto nos itens seguintes, as equações usadas no cálculo da confiabilidade dependem do tipo de agrupamento funcional dos componentes.

Tipos de agrupamento entre os componentes do sistema

As maneiras pelas quais os vários componentes podem ser combinados para dar origem a um sistema são inúmeras. Entretanto, serão apresentados aqui somente alguns tipos de agrupamentos, correspondendo aos encontrados com maior frequência em sistemas de distribuição.

Dois hipóteses fundamentais devem ser ressaltadas:

- os eventos falha e reparo dos equipamentos são independentes;
 - as equações apresentadas são válidas tanto para cálculos por tipo de falha individualmente, quanto para cálculos em que se consideram as falhas totais, independentes do tipo de falha.
- Para isso, deverão ser utilizados os dados adequados a cada situação.

Sistema "série"

Sistema série é aquele onde uma falha em qualquer um de seus componentes pode acarretar o desligamento de todo o sistema, ou, pelo menos, do setor situado a jusante do equipamento que protege o ponto defeituoso, conforme pode ser observado na figura A.1.

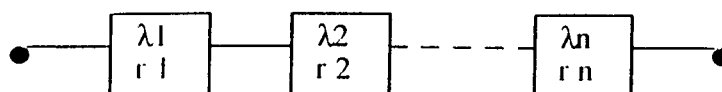


Figura A.1- Sistema série

- Taxa de falhas para o sistema-série:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{A.2})$$

- Duração da interrupção:

$$d_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i * r_i \quad (\text{A.3})$$

- Tempo médio de restabelecimento:

$$r = \frac{d_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i * r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (\text{A.4})$$

- Indisponibilidade:

$$D_s = \frac{d_s}{T} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i * r_i}{T} \quad (\text{A.5})$$

Onde T é o período de tempo adotado na análise.

- Confiabilidade:

$$C_s = 1 - D_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i * r_i}{T} \quad (\text{A.6})$$

A equação A.6 permite concluir que a confiabilidade de um sistema formado por componentes dispostos em série é menor (ou igual) que a confiabilidade de qualquer dos integrantes tomados individualmente.

Sistema paralelo

Sistema paralelo é aquele onde existem dois (ou mais) componentes em operação, dispostos em paralelo, embora fosse necessário apenas um deles para o atendimento da carga.

Seja a figura A.2, que exemplifica um sistema formado por dois componentes em paralelo.

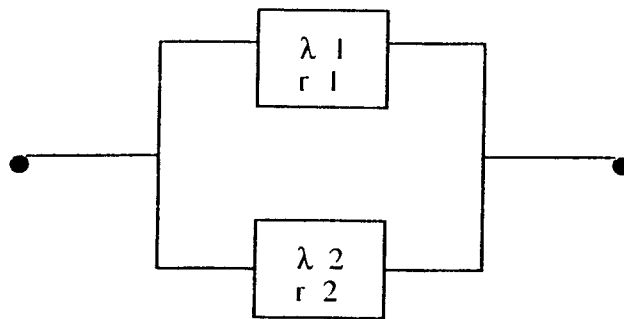


Figura A.2 - Sistema paralelo

- Taxa de falhas total do sistema paralelo:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 * \lambda_2 * (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 * r_1 + \lambda_2 * r_2} \quad (A.7)$$

Partindo de dados práticos, pode-se afirmar que $\lambda_1 * r_1$ e $\lambda_2 * r_2$ são muito menores que 1.

Então:

$$\lambda_p \cong \lambda_1 * \lambda_2 * (r_1 + r_2) \quad (A.8)$$

- Duração das interrupções :

$$d_p = \lambda_1 * \lambda_2 * r_1 * r_2 \quad (A.9)$$

- Tempo médio de restabelecimento:

$$r_p = \frac{d_p}{\lambda_p} = \frac{r_1 * r_2}{r_1 + r_2} \quad (\text{A.10})$$

- Indisponibilidade:

$$D = \frac{d_p}{T} = \frac{\lambda_1 * r_1 * \lambda_2 * r_2}{T} \quad (\text{A.11})$$

- Confiabilidade:

$$C_p = 1 - D_p = 1 - \frac{\lambda_1 * r_1 * \lambda_2 * r_2}{T} \quad (\text{A.12})$$

Como foi dito anteriormente, os termos $\lambda_1 * r_1$ e $\lambda_2 * r_2$ são, partindo-se de dados práticos, muito menores que 1, permitindo, portanto, que se conclua, a partir da equação A.12, que a confiabilidade de um sistema formado por componentes em paralelo seja maior (ou igual) que a confiabilidade de qualquer dos componentes tomados individualmente.

Sistema "seqüencial"

Sistema seqüencial é aquele em que, havendo falha no componente que está em operação, este é isolado para manutenção e substituído pelo que não estava em operação.

A figura A.3 mostra o esquema de um sistema seqüencial.

Deve-se ressaltar que o componente utilizado como substituto do primeiro só fica sujeito a falhas quando entra em operação. Enquanto não estiver em operação, admite-se que o componente não esteja sujeito a falhas.

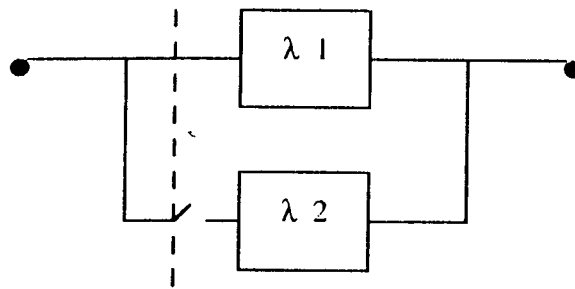


Figura A.3 - Sistema seqüencial

Há dois tipos de sistemas seqüenciais a serem considerados.

a) Sistema seqüencial automático.

É aquele em que, havendo uma falha no componente que está em operação, surge a condição para entrada imediata do equipamento substituto, automaticamente, sem causar interrupções sustentadas no suprimento. As pequenas interrupções causadas por falhas, nesse tipo de sistema, normalmente não devem ser consideradas no cômputo geral dos cálculos, por serem classificadas como *interrupções momentâneas*.

- Taxa de falhas do sistema seqüencial automático:

$$\lambda_{sqA} = \lambda_1 * \lambda_2 * r_1 \quad (A.13)$$

- Duração das interrupções:

$$d_{sqA} = \lambda_1 * \lambda_2 * r_1 * r_2 \quad (A.14)$$

- Tempo médio de restabelecimento:

$$r_{sqA} = \frac{d_{sqA}}{\lambda_{sqA}} = r_2 \quad (A.15)$$

- Indisponibilidade:

$$D_{sqA} = \frac{d_{sqA}}{T} = \frac{\lambda_1 * \lambda_2 * r_1 * r_2}{T} \quad (A.16)$$

- Confiabilidade:

$$C_{sqA} = 1 - D_{sqA} = 1 - \frac{\lambda_1 * \lambda_2 * r_1 * r_2}{T} \quad (A.17)$$

b) Sistema seqüencial não-automático.

É aquele em que todo o sistema fica afetado quando ocorre falha no componente que está em operação, até que se restabeleça, manualmente, a operação através do componente reserva.

- Taxa de falhas do sistema seqüencial não-automático:

$$\lambda_{sqN} = \lambda_1 + \lambda_1 * \lambda_2 * r_1 \quad (A.18)$$

- Duração das interrupções:

$$d_{sqN} = \lambda_1 * r + \lambda_1 * r_1 * \lambda_2 * r_2 \quad (A.19)$$

Onde r é o tempo médio necessário para isolar o componente que está em operação, quando em falha, e restabelecer a operação através do componente substituto.

- Tempo médio de restabelecimento:

$$r_{sqN} = \frac{d_{sqN}}{\lambda_{sqN}} = \frac{r + \lambda_2 * r_1 * r_2}{1 + \lambda_2 * r_1} \quad (A.20)$$

- Disponibilidade:

$$D_{sqN} = \frac{d_{sqN}}{T} = \frac{\lambda_1 * r + \lambda_1 * r_1 * \lambda_2 * r_2}{T} \quad (A.21)$$

- Confiabilidade:

$$C_{sqN} = 1 - \frac{D_{sqN}}{T} = 1 - \frac{\lambda_1 * r + \lambda_1 * r_1 * \lambda_2 * r_2}{T} \quad (A.22)$$

Falhas simultâneas

O tempo médio entre interrupções devido a falhas simultâneas em alimentadores pode ser calculado com a expressão a seguir:

$$T_k = \frac{k! * (n - k)! * n^{k-1}}{(n - 1)! * \lambda^k * r^{(k-1)} * |1 - \frac{\lambda * r}{n}|^{n-k}} \quad (A.23)$$

Onde:

- T_k é o número médio de anos entre falhas acidentais em k circuitos.
- n é o número total de circuitos primários.
- k é o número de circuitos sujeitos a falhas simultâneas com causas acidentais.
- λ é o número de falhas acidentais por alimentador, por ano.
- r é o tempo médio de restabelecimento de uma falha acidental em anos.

Aplicação de λ e r no cálculo do DEC e FEC de sistemas radiais

A teoria desenvolvida nos itens anteriores permite o cálculo do DEC e FEC, para qualquer tipo de sistema através do seu circuito equivalente.

Como os sistemas radiais são os mais utilizados em distribuição, será visto no presente item a metodologia para cálculo dos correspondentes valores de DEC e FEC.

Cálculo do DEC

Pode-se empregar a seguinte expressão:

$$DEC = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j * n_j * r_j * C_{a_j}}{C_s} \quad (\text{horas/consumidor/ano}) \quad (A.24)$$

Onde:

- λ_j é a taxa de falha do componente j , em falhas/unidade/ano ou falhas/km/ano.
- n_j é a quantidade de componentes j existentes no sistema, em unidades, ou km, no caso de alimentadores.
- r_j é o tempo médio de restabelecimento do componente j , em horas.
- C_{a_j} é o número de consumidores atingidos na interrupção causada por falhas no componente j .
- C_s é o número total de consumidores atendidos pelo sistema em análise.
- m é o número de diferentes tipos de componentes que serão considerados na análise.

Cálculo do FEC

Utiliza-se a seguinte expressão:

$$FEC = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j * n_j * C_{a_j}}{C_s} \quad (\text{interrupções/ano}) \quad (A.25)$$

Adaptação prática

Nos casos em que não se dispõe do número de consumidores atingidos numa interrupção causada por falha em um componente j , pode-se calcular os valores de DEC e FEC em função da potência atingida em cada interrupção, que coincide com os resultados obtidos das expressões A.24 e A.25, desde que se tenha, na área atendida pelo sistema em estudo, uma

densidade de carga uniforme. Isto é válido, pois, em qualquer interrupção causada por um componente j , seria verificada a relação:

$$\frac{MVA_j}{Ca_j} = \frac{MVA_{total}}{Cs} \quad (A.26)$$

Onde:

- MVA_j é a potência interrompida devido à interrupção causada por falha no componente j , em MVA.

- MVA_{total} é a carga total atendida pelo sistema analisado, em MVA.

A expressão A.24 tornar-se-ia:

$$DEC = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j * n_j * r_j * MVA_j}{MVA_{total}} \quad (\text{horas/MVA/ano ou horas/consumidor/ano}) \quad (A.27)$$

E a expressão A.25 teria a seguinte forma:

$$FEC = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j * n_j * MVA_j}{MVA_{total}} \quad (\text{inter./MVA/ano ou inter./consumidor/ano}) \quad (A.28)$$

Caso a densidade de carga na área atendida pelo sistema em questão não seja uniforme, ainda poderá ser utilizado o cálculo do DEC e FEC relativos à potência interrompida, desde que se efetue posteriormente a devida conversão para valores relativos a consumidores, procurando-se, para cada setor atingido por uma interrupção, uma relação própria de MVA/consumidor.

Valores máximos anuais de DEC e FEC

Apresenta-se a seguir o quadro anexo à portaria No. 046 de 17 de abril de 1978 do diretor geral do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica- DNAEE, com os valores máximos anuais de DEC e FEC .

Conjunto de Consumidores	DEC	FEC
	Horas	Número
Atendido por sistema subterrâneo com secundário reticulado.	15	20
Atendido por sistema subterrâneo com secundário radial.	20	25
Atendido por sistema aéreo, com mais de 50000 consumidores.	30	45
Atendido por sistema aéreo, com número de consumidores entre 15000 e 50000.	40	50
Atendido por sistema aéreo, com número de consumidores entre 5000 e 15000.	50	60
Atendido por sistema aéreo, com número de consumidores entre 1000 e 5000.	70	70
Atendido por sistema aéreo, com menos de 1000 consumidores.	120	90

Valores máximos anuais de Duração Equivalente de interrupção por Consumidor (DEC), Frequência Equivalente de interrupção por Consumidor (FEC)- Consumidor atendido em tensão de transmissão, subtransmissão, inferior a 69 kV, primária ou secundária de distribuição.

APÊNDICE B

COEFICIENTES c_j E b_j PARA A METODOLOGIA GU&C [19]

No capítulo 4 foi apresentada uma metodologia de tratamento de incertezas nos dados das taxas de falha e reparo dos componentes [19]. Esta técnica calcula o valor esperado e a variância da frequência de falha e indisponibilidade total de um sistema, e a partir desses resultados estabelece intervalos de confiança para aqueles índices, utilizando a Desigualdade de Chebyshev. Como a metodologia não identifica a função densidade de probabilidade dos índices, é feita uma aproximação, usando série de Taylor, para determinar o valor esperado e a variância dos índices (supondo que as taxas de falha e reparo sejam constantes). O resultado dessa aproximação é um conjunto de expressões apresentado abaixo:

$$E\{U_T\} = (U_T)_{bv} + \frac{1}{2} * \sum_{i=n}^n c_{i,u\lambda_j} * \sigma^2 \lambda_j + \frac{1}{2} * \sum_{i=n}^n c_{i,u\mu_j} * \sigma^2 \mu_j$$

$$\text{Var}\{U_T\} = \sum_{i=1}^n b^2_{i,u\lambda_j} * \sigma^2 \lambda_j + \sum_{i=1}^n b^2_{i,u\mu_j} * \sigma^2 \mu_j$$

$$E\{F_T\} = (F_T)_{bv} + \frac{1}{2} * \sum_{i=n}^n c_{i,f\lambda_j} * \sigma^2 \lambda_j + \frac{1}{2} * \sum_{i=n}^n c_{i,f\mu_j} * \sigma^2 \mu_j$$

$$\text{Var}\{F_T\} = \sum_{i=1}^n b^2_{i,f\lambda_j} * \sigma^2 \lambda_j + \sum_{i=1}^n b^2_{i,f\mu_j} * \sigma^2 \mu_j$$

Onde,

- i- corte mínimo de primeira ou segunda ordem.
- j- um componente do corte mínimo i.
- $E\{U_T\}$, $E\{F_T\}$ - valor esperado da indisponibilidade total e frequência de falha do sistema respectivamente
- $\text{Var}\{U_T\}$, $\text{Var}\{F_T\}$ - variância da indisponibilidade total e da frequência de falha respectivamente.

- $(Uf)_{bv}$, $(Ff)_{bv}$ - valor esperado da indisponibilidade total e frequência de falha do sistema sem a consideração de incertezas nos dados respectivamente.

- $\sigma^2\lambda_j$, $\sigma^2\mu_j$ - variâncias da taxa de falha e da taxa de reparo do componente j do corte, respectivamente

Os coeficientes b_j e c_j são obtidos mediante a derivação das expressões de frequência de falha e indisponibilidade total sem a consideração de incertezas, que são apresentadas a seguir para cortes de primeira e segunda ordem. Não obstante a metodologia GU&C [19] considerar cortes de terceira ordem, optou-se por não representar suas expressões, e seus coeficientes, uma vez que neste trabalho são considerados apenas os cortes de primeira e segunda ordens (que são os de valor mais significativo).

Os coeficientes apresentam as seguintes fórmulas gerais:

$$b_{i,f\lambda_j} = \frac{\partial(Ff)_{ibv}}{\partial\lambda_j} \quad b_{i,f\mu_j} = \frac{\partial(Ff)_{ibv}}{\partial\mu_j} \quad c_{i,f\lambda_j} = \frac{\partial^2(Ff)_{ibv}}{\partial^2\lambda_j} \quad c_{i,f\mu_j} = \frac{\partial^2(Ff)_{ibv}}{\partial^2\mu_j}$$

$$b_{i,u\lambda_j} = \frac{\partial(Uf)_{ibv}}{\partial\lambda_j} \quad b_{i,u\mu_j} = \frac{\partial(Uf)_{ibv}}{\partial\mu_j} \quad c_{i,u\lambda_j} = \frac{\partial^2(Uf)_{ibv}}{\partial^2\lambda_j}$$

$$c_{i,u\mu_j} = \frac{\partial^2(Uf)_{ibv}}{\partial^2\mu_j}$$

Para cortes mínimos de primeira ordem (falha do componente j).

$$(Uf)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * 8760 \quad (Ff)_{ibv} = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * \mu_j$$

$$b_{f,\lambda_j} = \frac{\mu_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^2} \quad b_{f,\mu_j} = \frac{\lambda_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^2}$$

$$\begin{aligned}
 c_{1,l\lambda_j} &= \frac{-2 * \mu_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^3} & c_{1,l\mu_j} &= \frac{-2 * \lambda_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^3} \\
 b_{1,u\lambda_j} &= \frac{\mu_j}{(\lambda_j + \mu_j)^2} * 8760 & b_{1,u\mu_j} &= \frac{-\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)^2} * 8760 \\
 c_{1,u\lambda_j} &= \frac{-2 * \mu_j}{(\lambda_j + \mu_j)^3} * 8760 & c_{1,u\mu_j} &= \frac{2 * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)^3} * 8760
 \end{aligned}$$

Para cortes mínimos de segunda ordem (fálhas dos componente j e k):

$$\begin{aligned}
 (U_1)_{bv} &= \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_k} * 8760 & (E_1)_{bv} &= \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} * \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_k} * (\mu_j + \mu_k) \\
 b_{2,l\lambda_j} &= \frac{\mu_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^2} * \frac{(\mu_j + \mu_k) * \lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} & b_{2,l\mu_j} &= \frac{\lambda_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^2} * \frac{(\lambda_j - \mu_k) * \lambda_k}{\lambda_k + \mu_k} \\
 c_{2,l\lambda_j} &= \frac{-2 * \mu_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^3} * \frac{(\mu_j + \mu_k) * \lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} & c_{2,l\mu_j} &= \frac{-2 * \lambda_j^2}{(\lambda_j + \mu_j)^3} * \frac{(\lambda_j - \mu_k) * \lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} \\
 b_{2,u\lambda_j} &= \frac{\mu_j}{(\lambda_j + \mu_j)^2} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * 8760 & b_{2,u\mu_j} &= \frac{-\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)^2} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * 8760 \\
 c_{2,u\lambda_j} &= \frac{-2 * \mu_j}{(\lambda_j + \mu_j)^3} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * 8760 & & \\
 c_{2,u\mu_j} &= \frac{2 * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)^3} * \frac{\lambda_k}{(\lambda_k + \mu_k)} * 8760 & &
 \end{aligned}$$

Os coeficientes relativos ao componente k são análogos aos anteriores, bastando trocar j por k e k por j.

APÊNDICE C

COEFICIENTES c_j E b_j PARA A METODOLOGIA CSTD

No capítulo 5 são acrescentados à metodologia GU&C [19] vários modos de falha, que não foram considerados no capítulo 4 (onde são consideradas apenas as falhas passivas ou permanentes). Os modos de falha: falha passiva de primeira ordem, falha passivas de segunda ordem, falha ativa de primeira ordem, falha ativa conjugada a falha passiva, falha ativa de um componente quando um outro está em manutenção, e as equações de frequência para falhas temporárias (falha temporária de primeira ordem, falha temporária conjugada a falha passiva, e falha temporária de um componente quando um outro está em manutenção), têm expressões de frequência de falha e/ou indisponibilidade total sem a consideração de incertezas nos dados iguais às equações 4.22 e 4.23. Como os coeficientes são deduzidos a partir destas equações, para estes modos de falha os coeficientes b_j e c_j são basicamente os mesmos do apêndice B (mas serão apresentados neste apêndice também).

Os modos de falha: falha passiva de um componente quando um outro está em manutenção, e as expressões de indisponibilidade total para falhas temporárias, apresentam, porém, equações diferentes das 4.22 e 4.23, que são mostradas abaixo.

Falha de um componente quando outro está em manutenção.

$$(P_i)_{bv} = \frac{\lambda_i * \lambda_j'' * \mu_i'' + \lambda_i'' * \lambda_j * \mu_j''}{\mu_i'' * \mu_j}$$

$$(U_i)_{bv} = \frac{\lambda_i * \lambda_j''}{\mu_j'' * (\mu_i + \mu_j'')} + \frac{\lambda_i'' * \lambda_j}{\mu_i'' * (\mu_i'' + \mu_j)} * 8760$$

Falha temporária de um componente (apenas indisponibilidade total)

$$(U_i)_{bv} = \frac{\lambda_i}{\mu_c} * 8760$$

Falha temporária conjugada a falha passiva (apenas indisponibilidade total):

$$(U_f)_{bv} = \frac{\lambda_i * \lambda_j * (\mu_i + \mu_j)}{\mu_i * \mu_j * \mu_c} * 8760$$

Falha temporária de um componente quando outro esta em manutenção (apenas indisponibilidade total):

$$(U_f)_{bv} = \frac{\lambda_i * \lambda_j'' * (\mu_i + \mu_j'')}{\mu_i * \mu_j'' * \mu_c} * 8760$$

Onde:

λ , λ' , λ'' - taxa de falha passiva, taxa de falha ativa e taxa de manutenção, respectivamente.

μ , μ' , μ'' - taxa de reparo referente a falha passiva, taxa de reparo referente a falha ativa e taxa de reparo referente a manutenção.

μ_c - taxa de reparo referente ao tempo de chaveamento t_c .

Novos coeficientes para os casos citados acima foram deduzidos, e serão mostrados a seguir, juntamente com aqueles referentes aos modos de falha em que não houveram alterações nas expressões de $(Ff)_{bv}$ e $(Uf)_{bv}$. Para o modo falha ativa de um componente conjugado a um disjuntor preso, basta multiplicar pelos coeficientes relativos à falha ativa de primeira ordem o valor da probabilidade de disjuntor preso.

Falhas passivas de primeira ordem (falha do componente i).

$$b_{1,\lambda_i} = \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2} \quad b_{1,\mu_i} = \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2}$$

$$b_{1,u\lambda_i} = \frac{\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * 8760 \quad b_{1,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * 8760$$

$$c_{1,\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3} \quad c_{1,\mu_i} = \frac{-2 * \lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3} \quad c_{1,u\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * 8760$$

$$c_{1,u\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * 8760$$

Falhas passivas de segunda ordem (componentes i e j falham):

$$b_{2,l\lambda_i} = \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} \quad b_{2,l\mu_i} = \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i) * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)}$$

$$b_{2,u\lambda_i} = \frac{\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760 \quad b_{2,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760$$

$$c_{2,l\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} \quad c_{2,l\mu_i} = \frac{-2 * \lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)}$$

$$c_{2,u\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760 \quad c_{2,u\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760$$

Para a obtenção dos coeficientes relativos ao componente j basta trocar os índices i pelos índices j nas expressões acima

Falha passiva de um componente quando outro está em manutenção componente i falha, estando o componente j em manutenção (evento i, j"), e componente j falha estando o componente i em manutenção (evento j, i"), serão apresentados apenas os coeficientes diferentes de zero:

$$b_{2,l\lambda_i} = \frac{\lambda''_j}{\mu''_j} \quad b_{2,l\lambda''_j} = \frac{\lambda_i}{\mu''_j} \quad b_{2,l\mu''_j} = \frac{-\lambda_i * \lambda''_j}{\mu''_j^2} \quad c_{2,l\mu''_j} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda''_j}{\mu''_j^3}$$

$$b_{2,u\lambda_i} = \frac{\lambda''_j}{\mu''_j * (\mu_i + \mu''_j)} * 8760 \quad b_{2,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i * \lambda''_j}{\mu''_j * (\mu_i + \mu''_j)^2} * 8760$$

$$\begin{aligned}
 b_{2,u\lambda''_j} &= \frac{\lambda_j}{\mu''_j * (\mu_i + \mu''_j)} * 8760 & b_{2,u\mu''_j} &= \frac{-\lambda_i * \lambda''_j * (2 * \mu''_j + \mu_i)}{\mu''_j^2 * (\mu_i + \mu''_j)^2} * 8760 \\
 c_{2,\lambda''_j} &= \frac{2 * \lambda_i * \lambda''_j}{\mu''_j^3} & c_{2,\mu''_j} &= \frac{2 * \lambda_i * \lambda''_j}{\mu''_j * (\mu_i + \mu''_j)^3} * 8760 \\
 c_{2,u\mu''_j} &= \frac{\lambda_i * \lambda''_j * \{(2 * \mu''_j + \mu_i) * [2 * (\mu_i + \mu''_j) + 2 * \mu''_j] - 2 * \mu''_j * (\mu_i + \mu''_j)\}}{\mu''_j^3 * (\mu_i + \mu''_j)^3} * 8760
 \end{aligned}$$

Para a obtenção dos coeficientes relativos ao evento j, i'' : trocar os índices i por j , e i'' por j'' nas expressões acima.

Falhas ativas de primeira ordem (falha do componente i).

$$\begin{aligned}
 b_{1,\lambda_i} &= \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2} & b_{1,\mu_i} &= \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2} \\
 b_{1,u\lambda_i} &= \frac{\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * 8760 & b_{1,u\mu_i} &= \frac{-\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * 8760 \\
 c_{1,\lambda_i} &= \frac{-2 * \mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3} & c_{1,\mu_i} &= \frac{-2 * \lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3} \\
 c_{1,u\lambda_i} &= \frac{-2 * \mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * 8760 & c_{1,u\mu_i} &= \frac{2 * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * 8760
 \end{aligned}$$

Falha ativa de um componente, estando outro em falha passiva (componentes i e j falham):

$$\begin{aligned}
 b_{2,\lambda_i} &= \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} & b_{2,\mu_i} &= \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i) * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} \\
 b_{2,u\lambda_i} &= \frac{\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760 & b_{2,u\mu_i} &= \frac{-\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760
 \end{aligned}$$

$$c_{2,i\lambda_i} = \frac{-2*\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)}$$

$$c_{2,i\mu_i} = \frac{-2*\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)}$$

$$c_{2,u\lambda_i} = \frac{-2*\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760$$

$$c_{2,u\mu_i} = \frac{2*\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * \frac{\lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} * 8760$$

Para a obtenção dos coeficientes relativos ao componente j basta trocar os índices i pelos índices j nas expressões acima.

Falha ativa de um componente estando outro em manutenção (componente i falha estando o componente j em manutenção):

$$b_{2,i\lambda_i} = \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)}$$

$$b_{2,i\mu_i} = \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2 * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)}$$

$$b_{2,i\lambda''_j} = \frac{\mu''_j^2}{(\lambda''_j + \mu''_j)^2 * \mu''_j} * \frac{(\mu''_j + \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)}$$

$$b_{2,i\mu''_j} = \frac{\lambda''_j^2}{(\lambda''_j + \mu''_j)^2 * \lambda''_j} * \frac{(\lambda''_j - \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)}$$

$$b_{2,u\lambda_i} = \frac{\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * \frac{\lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)} * 8760$$

$$b_{2,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * \frac{\lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)} * 8760$$

$$b_{2,u\lambda''_j} = \frac{\mu''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)^2} * \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)} * 8760$$

$$b_{2,\mu''_j} = \frac{-\lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)^2} * \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)} * 8760$$

$$c_{2,\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)}$$

$$c_{2,\mu_i} = \frac{-2 * \lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)}$$

$$c_{2,\lambda''_j} = \frac{-2 * \mu''_j^2}{(\lambda''_j + \mu''_j)^3 * \mu''_j} * \frac{(\mu''_j + \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)}$$

$$c_{2,\mu''_j} = \frac{-2 * \lambda''_j^2}{(\lambda''_j + \mu''_j)^3 * \lambda''_j} * \frac{(\lambda''_j - \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)}$$

$$c_{2,\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * \frac{\lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)} * 8760$$

$$c_{2,\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * \frac{\lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)} * 8760$$

$$c_{2,\lambda''_j} = \frac{-2 * \mu''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)^3} * \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)} * 8760$$

$$c_{2,\mu''_j} = \frac{2 * \lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)^3} * \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)} * 8760$$

Falha ativa de um componente estando um disjuntor preso (componente i falha, disjuntor j esta preso)- p_j é a probabilidade do disjuntor j estar preso.

$$b_{1,\lambda_i} = \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * P_j$$

$$b_{1,\mu_i} = \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * P_j$$

$$b_{1,u\lambda_i} = \frac{\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * p_j * 8760$$

$$b_{1,u\mu_i} = \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^2} * p_j * 8760$$

$$c_{1,l\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * p_j$$

$$c_{1,l\mu_i} = \frac{-2 * \lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * p_j$$

$$c_{1,u\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * p_j * 8760$$

$$c_{1,u\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)^3} * p_j * 8760$$

Falhas temporárias de primeira ordem (falha do componente i):

$$b_{1,l\lambda_i} = \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2} \quad b_{1,l\mu_i} = \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2}$$

$$b_{1,u\lambda_i} = \frac{1}{\mu_c} * 8760 \quad c_{1,l\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3}$$

$$c_{1,l\mu_i} = \frac{-2 * \lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3}$$

Falha temporária de um componente, estando outro em falha passiva (componentes i e j falham):

$$b_{2,l\lambda_i} = \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} \quad b_{2,l\mu_i} = \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i) * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)}$$

$$b_{2,u\lambda_i} = \frac{\lambda_j * (\mu_i + \mu_j)}{\mu_i * \mu_j * \mu_c} * 8760 \quad b_{2,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i * \lambda_j}{\mu_i^2 * \mu_c} * 8760$$

$$c_{2,l\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)} \quad c_{2,l\mu_i} = \frac{-2 * \lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu_j) * \lambda_j}{(\lambda_j + \mu_j)}$$

$$c_{2,u\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda_j}{\mu_i^3 * \mu_c} * 8760$$

Para a obtenção dos coeficientes relativos ao componente j basta trocar os índices i pelos índices j nas expressões acima.

Falha temporária de um componente estando outro em manutenção (componente i falha, estando o componente j em manutenção)

$$b_{2,l\lambda_i} = \frac{\mu_i^2}{(\lambda_i + \mu_i)^2 * \mu_i} * \frac{(\mu_i + \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)} \quad b_{2,l\mu_i} = \frac{\lambda_i^2}{(\lambda_i + \mu_i) * \lambda_i} * \frac{(\lambda_i - \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda''_j + \mu''_j)}$$

$$b_{2,l\lambda''_j} = \frac{\mu''_j^2}{(\lambda''_j + \mu''_j)^2 * \mu_j} * \frac{(\mu''_j + \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)}$$

$$b_{2,l\mu''_j} = \frac{\lambda''_j^2}{(\lambda''_j + \mu''_j) * \lambda''_j} * \frac{(\lambda''_j - \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)}$$

$$b_{2,u\lambda_i} = \frac{\lambda_j * (\mu_i + \mu''_j)}{\mu_i * \mu''_j * \mu_c} * 8760 \quad b_{2,u\mu_i} = \frac{-\lambda_i * \lambda''_j}{\mu_i^2 * \mu_c} * 8760$$

$$b_{2,u\lambda''_j} = \frac{\lambda_i * (\mu''_j + \mu_i)}{\mu_i * \mu''_j * \mu_c} * 8760$$

$$b_{2,u\mu''_j} = \frac{-\lambda_i * \lambda''_j}{\mu''_j^2 * \mu_c} * 8760$$

$$c_{2,l\lambda_i} = \frac{-2 * \mu_i^2 * (\mu_i + \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \mu_i * (\lambda''_j + \mu''_j)}$$

$$c_{2,l\mu_i} = \frac{-2 * \lambda_i^2 * (\lambda_i - \mu''_j) * \lambda''_j}{(\lambda_i + \mu_i)^3 * \lambda_i * (\lambda''_j + \mu''_j)} \quad c_{2,l\lambda''_j} = \frac{-2 * \mu''_j^2 * (\mu''_j + \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda''_j + \mu''_j)^3 * \mu''_j * (\lambda_i + \mu_i)}$$

$$c_{2,l\mu''_j} = \frac{-2 * \lambda''_j^2 * (\lambda''_j - \mu_i) * \lambda_i}{(\lambda''_j + \mu_i)^3 * \lambda_i * (\lambda_i + \mu_i)}$$

$$c_{2,u\mu_i} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda''_j}{\mu_i^3 * \mu_c} * 8760$$

$$c_{2,u\mu''_j} = \frac{2 * \lambda_i * \lambda''_j}{\mu''_j^3 * \mu_c} * 8760$$

APÊNDICE D

COMPONENTES QUE INTERROMPEM O FORNECIMENTO NOS MODOS DE FALHA QUE ENVOLVEM A ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO NOS SISTEMAS 1 E 3

Neste apêndice serão apresentados os componentes responsáveis pela interrupção do fornecimento aos pontos de carga dos Sistemas 1 e 3, nos modos de falha que envolvem a atuação da proteção, isto é, falhas ativas e falhas ativas conjugadas a disjuntor preso.

Os Sistemas 1 e 3 são radiais, sendo necessária a aplicação das alterações propostas na seção 5.5 (para análise de sistemas radiais).

O Sistema 1 apresenta apenas um ponto de carga, portanto seus resultados serão apresentados de forma completa. Para o Sistema 2, devido ao grande número de pontos de carga, os resultados serão apresentados para dois pontos de carga escolhidos em virtude de sua distância ao ponto fonte. Serão apresentados também os caminhos mínimos para cada ponto de carga analisado.

Sistema 1

O Sistema 1 é uma subestação de distribuição, com configuração radial, doze componentes e apenas um ponto de carga (ver Capítulo 6, seção 6.3.1). Dispõe de cinco disjuntores: os componentes 3, 4, 5, 10 e 11, os quais apresentam probabilidade de ficarem presos quando chamados a operar. Na tabela D.1 são apresentados os caminhos mínimos entre fonte(s) e carga, indicando o número e os componentes do sistema que deles fazem parte.

Caminho mínimo	Componentes do caminho
1	12, 10, 8, 6, 3, 1
2	12, 11, 9, 7, 4, 2
3	12, 10, 8, 6, 5, 4, 2
4	12, 11, 9, 7, 5, 3, 1

Tabela D.1- Caminhos mínimos do Sistema 1

Nas tabelas D.2 e D.3 são apresentados os componentes responsáveis pelo isolamento das falhas ativas e interrupção do fornecimento à carga, em cada caminho mínimo, para os modos falha ativa e falha ativa conjugada a disjuntor preso.

Na tabela D.2 o componente que sofre falha ativa é aquele que a proteção tem que isolar, e que neste processo pode causar a interrupção do fornecimento à carga em um caminho mínimo. Neste caso o disjuntor que isola a falha ativa é o componente que interrompe o fornecimento. Se não houver disjuntor a montante do componente que sofreu falha ativa, a falha deverá ser isolada, naquele caminho, pela subestação, ou seja, alguma proteção situada nos pontos fonte.

Se todos os caminhos mínimos forem interrompidos um corte mínimo foi identificado. Além dos disjuntores e da subestação, o fornecimento à carga também pode ser interrompido pelo componente que sofre falha passiva, se se tratar de um corte mínimo de segunda ordem.

Passando para a tabela D.3, se a proteção atuasse corretamente, o componente que sofre falha ativa não iria provocar a interrupção do fornecimento à carga. Como, porém, conjugada à falha ativa há um disjuntor preso, a proteção de retaguarda (outro disjuntor ou a subestação) tem que atuar, e neste processo interrompe o fornecimento. É bom ressaltar também, que a proteção de retaguarda tem que isolar ambas as falhas (a falha ativa e o disjuntor preso). Novamente se todos os caminhos mínimos forem interrompidos identificou-se um corte mínimo.

Componente que sofre falha ativa	Componente que sofre falha passiva	Caminho	Componente que interrompe fornec.
5	-	1	3
5	-	2	4
5	-	3	4
5	-	4	3

Tabela D.2 - Componentes que interrompem o fornecimento no modo falhas ativas no Sistema I.

Componente que sofre falha ativa	Componente que sofre falha passiva	Caminho	Componente que interrompe fornec.
10	-	1	3
10	-	2	11
10	-	3	5
10	-	4	11
11	-	1	10
11	-	2	4
11	-	3	10
11	-	4	5
7	1	1	1
7	1	2	4
7	1	3	4
7	1	4	5
9	1	1	1
9	1	2	4
9	1	3	4
9	1	4	5
6	2	1	3
6	2	2	2
6	2	3	5
6	2	4	3
8	2	1	3
8	2	2	2
8	2	3	5
8	2	4	3
7	3	1	3
7	3	2	4
7	3	3	4
7	3	4	5
9	3	1	3
9	3	2	4
9	3	3	4
9	3	4	5
6	4	1	3
6	4	2	4
6	4	3	5
6	4	4	3
8	4	1	3
8	4	2	4
8	4	3	5
8	4	4	3
4	6	1	6
4	6	2	Subestação
4	6	3	Subestação
4	6	4	5

Continuação da tabela D 2.

Componente que sofre falha ativa	Componente que sofre falha passiva	Caminho	Componente que interrompe fornec.
3	7	1	Subestação
3	7	2	7
3	7	3	5
3	7	4	Subestação
4	8	1	8
4	8	2	Subestação
4	8	3	Subestação
4	8	4	5
3	9	1	Subestação
3	9	2	9
3	9	3	5
3	9	4	Subestação
4	10	1	10
4	10	2	Subestação
4	10	3	Subestação
4	10	4	5
3	11	1	Subestação
3	11	2	11
3	11	3	5
3	11	4	Subestação

Continuação da tabela D.2.

Componente que sofre falha ativa	Disjuntor preso	Caminho	Componente que interrompe o fornec.
3	5	1	Subestação
3	5	2	4
3	5	3	4
3	5	4	Subestação
3	10	1	Subestação
3	10	2	11
3	10	3	5
3	10	4	Subestação
4	5	1	3
4	5	2	Subestação
4	5	3	Subestação
4	5	4	3
4	11	1	10
4	11	2	Subestação
4	11	3	Subestação
4	11	4	5

Tabela D.3 - Componentes que interrompem o fornecimento no modo falha ativa conjugada a disjuntor preso no sistema I.

Componente que sofre falha ativa	Disjuntor preso	Caminho	Componente que interrompe o fornec.
6	5	1	3
6	5	2	4
6	5	3	4
6	5	4	3
6	10	1	3
6	10	2	11
6	10	3	5
6	10	4	11
7	5	1	3
7	5	2	4
7	5	3	4
7	5	4	3
7	11	1	10
7	11	2	4
7	11	3	10
7	11	4	5
8	10	1	3
8	10	2	11
8	10	3	5
8	10	4	11
8	5	1	3
8	5	2	4
8	5	3	4
8	5	4	3
9	11	1	10
9	11	2	4
9	11	3	10
9	11	4	5
9	5	1	3
9	5	2	4
9	5	3	4
9	5	4	3

Continuação da tabela D.3.

Sistema 3

O Sistema 3 é um sistema de distribuição radial com recursos (dois componentes N.A.), que possui vinte e dois pontos de carga, e cento e treze componentes (ver Capítulo 6, seção 6.3.3). Todos os fusíveis e disjuntores do Sistema 3 são 100% confiáveis, de modo que não há falhas por disjuntor (ou fusível) preso, e os componentes N.A. (73 e 113) podem vir a atuar

como disjuntores quando necessário. Os demais disjuntores que podem vir a atuar no sistema são os componentes 44, 45, 46 e 47.

Aplicando a metodologia CSTDI, pode-se identificar os disjuntores (ou componentes N.A.) que isolam as falhas ativas em cada caminho mínimo entre fonte e cada ponto de carga. Dado o grande número de pontos, optou-se por apresentar os resultados para apenas dois: LP1, mais próximo do ponto fonte, e LP15, mais distante (ver figura 6.3). Na tabela D.4 são apresentados os caminhos mínimos para os dois pontos de carga selecionados, e nas tabelas D.5 e D.6 os resultados da aplicação da metodologia.

Ponto de carga	Caminho mínimo	Elementos
LP1	1	50, 2, 49, 48, 1, 44, 43, 41, 39, 38, 37
	2	50, 2, 49, 53, 4, 54, 59, 7, 60, 65, 10, 66, 73, 71, 14, 70, 12, 45, 43, 41, 39, 38, 37
	3	50, 2, 49, 48, 1, 44, 43, 42, 38, 37
	4	50, 2, 49, 53, 4, 54, 59, 7, 60, 65, 10, 66, 73, 71, 14, 70, 12, 45, 43, 42, 40, 38, 37
LP15	1	94, 27, 93, 92, 26, 47, 43, 41, 39, 38, 37
	2	94, 27, 93, 97, 29, 98, 103, 32, 104, 107, 34, 108, 113, 89, 24, 88, 83, 21, 82, 77, 18, 76, 16, 46, 43, 41, 39, 38, 37
	3	94, 27, 93, 92, 26, 47, 43, 42, 40, 38, 37
	4	94, 27, 93, 97, 29, 98, 103, 32, 104, 107, 34, 108, 113, 89, 24, 88, 83, 21, 82, 77, 18, 76, 16, 46, 43, 42, 40, 38, 37

Tabela D.4 - Caminhos mínimos dos pontos de carga LP1 e LP15 do sistema 3.

Componente que sofre falha ativa	Componente que sofre falha passiva	Caminho	Componente que interrompe o fornecimento
1	-	1	44
1	-	2	73
1	-	3	44
1	-	4	73
4	-	1	44
4	-	2	73
4	-	3	44
4	-	4	73

Tabela D.5 - Componentes que interrompem o fornecimento no modo falhas ativas, para o ponto LP1 do sistema 3.

Componente que sofre falha ativa	Componente que sofre falha passiva	Caminho	Componente que interrompe o fornecimento
7	-	1	44
7	-	2	73
7	-	3	44
7	-	4	73

Continuação da Tabela D.5

Componente que sofre falha ativa	Componente que sofre falha passiva	Caminho	Componente que interrompe o fornecimento
10	-	1	44
10	-	2	73
10	-	3	44
10	-	4	73
16	-	1	46
16	-	2	113
16	-	3	46
16	-	4	113
18	-	1	46
18	-	2	113
18	-	3	46
18	-	4	113
21	-	1	46
21	-	2	113
21	-	3	46
21	-	4	113
24	-	1	46
24	-	2	113
24	-	3	46
24	-	4	113

Tabela D.6 - Componentes que interrompem o fornecimento no modo falhas ativas, para o ponto LP15 do sistema 3.

Como os disjuntores e fusíveis são 100% confiáveis, não há falhas ativas conjugadas a disjuntor (ou fusível) preso. Os componentes 73 e 113 são N.A. (normalmente abertos), que atuam como disjuntores nos caminhos mínimos que os contém.