

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

JOÃO LUIS REIS E SILVA

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS COM BASE NOS PARÂMETROS DE  
QUALIDADE DA ENERGIA

BELO HORIZONTE  
MINAS GERAIS - BRASIL

2008

JOÃO LUIS REIS E SILVA

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS COM BASE NOS PARÂMETROS DE  
QUALIDADE DA ENERGIA

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Minas Gerais  
como um dos pré-requisitos para a  
obtenção do título de especialista em  
Sistemas de Energia Elétrica ênfase  
em Qualidade da Energia.

Prof. Dr. Benjamim Rodrigues de Menezes (Orientador)

Prof. Dr. Walmir Matos Caminhas (co-Orientador)

BELO HORIZONTE  
MINAS GERAIS - BRASIL

2008

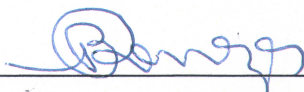
JOÃO LUIS REIS E SILVA

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS COM  
BASE NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ENERGIA

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Minas Gerais  
como um dos pré-requisitos para a  
obtenção do título de especialista em  
Sistemas de Energia Elétrica ênfase  
em Qualidade da Energia.

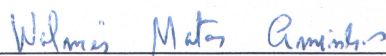
Aprovada em 12 / 09 / 2008

Banca Examinadora



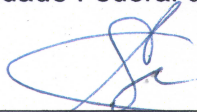
---

Prof. Dr. Benjamim Rodrigues de Menezes (Orientador)  
Universidade Federal de Minas Gerais



---

Prof. Dr. Walmir Matos Caminhas (co-Orientador)  
Universidade Federal de Minas Gerais



---

Prof. Dr. Carlos Andrey Maia  
Universidade Federal de Minas Gerais

## AGRADECIMENTOS

Aos orientadores deste projeto de Monografia, professores Benjamim Rodrigues de Menezes e Walmir Matos Caminhas, pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento do tema abordado.

Meus agradecimentos à Votorantim Metais - Unidade Três Marias e Votorantim Siderurgia - unidade Resende, pelo apoio e incentivo financeiro do programa de bolsas para cursos de extensão universitária. Agradeço também aos meus colegas e professores do curso de especialização em sistemas de energia elétrica, ênfase em qualidade da energia, da Universidade Federal de Minas Gerais.

## RESUMO

Os eventos de natureza aleatória característicos dos parâmetros de qualidade da energia, principalmente interrupções e afundamentos de tensão, influenciam de forma significativa a disponibilidade de um sistema elétrico. A importância do conhecimento desta disponibilidade vem motivando diversos estudos de confiabilidade, uma vez que consumidores e principalmente setores comerciais e industriais estão cada vez mais sensíveis, devido às margens de lucro cada vez menores, às perdas financeiras associadas à indisponibilidade do sistema elétrico. O objetivo deste trabalho reside em calcular a disponibilidade e confiabilidade, através de simulações de ocorrências de afundamentos de tensão e interrupções em diagramas de blocos de confiabilidade, para diversos níveis hierárquicos de um dado sistema elétrico. Espera-se também avaliar a melhor maneira para o aumento da disponibilidade e confiabilidade de forma a evitar o emprego de redundâncias de equipamentos e também de grandes modificações de topologia do sistema avaliado.

## ABSTRACT

The random characteristics of power quality parameters, primarily interruptions and voltage sags, makes significantly influence to the availability of an electrical system. The knowledge of this availability motivates many studies in the field of reliability, since consumers and specially commercial and industrial sectors are increasingly sensitive due to lowers profits margins caused by electrical system unavailability. The objective of this work is to calculate the availability and reliability through reliability block diagram simulations for interruptions and voltage sags in various hierarchical levels of a given electrical system. It is also expected to assess the best way to increase the availability and reliability avoiding the use of redundancies and strong modifications in the topology of the system evaluated.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Susceptibilidade de cargas para os eventos de afundamento de tensão. .....	22
Figura 2.2 – Histograma tridimensional para os eventos de afundamento de tensão para uma amostragem de um ano. ....	22
Figura 3.1 – Diagrama de estados para um motor elétrico. ....	33
Figura 3.2 – Exemplo de uma cadeia de Markov com 3 estágios. ....	34
Figura 3.3 – Modelo de Markov para um componente com dois estados. ....	35
Figura 3.4 – Curvas de custos para a indisponibilidade versus confiabilidade.....	38
Figura 4.1 – Densidade de probabilidade discreta. ....	40
Figura 4.2 - Densidade de probabilidade contínua.....	40
Figura 4.3 - Densidade de probabilidade contínua.....	47
Figura 5.1 – Exemplo de um bloco de confiabilidade. ....	48
Figura 5.2 – Exemplo de um sistema série. ....	49
Figura 5.3 – Avaliação da confiabilidade para blocos em série.....	50
Figura 5.4 – Exemplo de um sistema em paralelo. ....	50
Figura 5.5 – Avaliação da confiabilidade para blocos em paralelo.....	52
Figura 5.6 – Exemplo de um sistema k de n para um grupo de geradores. ....	53
Figura 5.7 – RBD para o exemplo da figura 5.6. ....	53
Figura 5.8 – Exemplo de um RBD para um sistema misto.....	54
Figura 5.9 – Exemplo de redundância <i>Load Sharing</i> entre os blocos A e B. ....	55
Figura 5.10 – Exemplo de redundância <i>Standby</i> entre os blocos 1 e 2. ....	58
Figura 5.11 – Exemplo de redundância <i>Standby</i> com chaveamento entre os blocos 1 e 2. ....	59
Figura 5.12 – Impedâncias retratadas em um circuito elétrico. ....	60
Figura 5.13 – Impedâncias retratadas em um RBD. ....	60

Figura 6.1 – Mapa das unidades da Votorantim Metais na America do Sul. ....	61
Figura 6.2 – Linha de transmissão 138 kV. ....	62
Figura 6.3 – Cubículos de distribuição em 13,8 kV. ....	63
Figura 6.4 – Transformador retificador de 40 MVA. ....	63
Figura 6.5 – Diagrama unifilar da VMZ-TM contemplando as linhas de transmissões, Pátio 138 kV e .....	64
Figura 6.6 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de uma interrupção causada pela .....	65
Figura 6.7 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de uma interrupção causada pela .....	66
Figura 6.8 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de uma interrupção causada pela .....	66
Figura 6.9 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de um afundamento de tensão .....	67
Figura 6.10 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de um afundamento de tensão .....	67
Figura 6.11 – Diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema de geração (Nível I).....	69
Figura 6.12 – Diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema de transmissão e Nível II. ....	69
Figura 6.13 – Diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema de distribuição e Nível III. ....	70
Figura 6.14 – Relação dos dez equipamentos que mais impactaram na disponibilidade do sistema .....	75



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados sobre causa de falhas num sistema de transmissão de um setor de utilidades do Reino Unido.....	31
Tabela 6.1 – Resumo das análises de distribuição da VMZ-TM.....	68
Tabela 6.2 – Taxa de falhas provenientes de normas internacionais utilizadas para os equipamentos elétricos da VMZ-TM.....	71
Tabela 6.3 – Tempo médio para reparo proveniente de normas internacionais utilizadas para os equipamentos elétricos da VMZ-TM.....	71
Tabela 6.4 – Taxa de falhas utilizadas para os equipamentos elétricos da VMZ-TM.....	72
Tabela 6.5 – Tempo para reparo corretivo utilizando a função lognormal com os parâmetros de média e desvio padrão.....	73
Tabela 6.6 – Tempo para reparo corretivo utilizando a função lognormal simplificada com os parâmetros beta e alfa.....	73
Tabela 6.7 – Resultado da simulação do sistema elétrico da VMZ-TM.....	74

## SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Motivação e Revisão da Literatura.....	12
1.2	Estrutura do Texto e Metodologias Utilizadas.....	13
2.0	PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ENERGIA.....	15
2.1	Importância do Estudo de Qualidade da Energia.....	15
2.2	Definições sobre os Parâmetros de Qualidade da Energia.....	16
2.2.1	Fenômenos Transitórios .....	16
2.2.2	Variações de Tensão de Longa Duração.....	17
2.2.3	Variações de Tensão de Curta Duração.....	17
2.2.4	Fenômenos Relativos à Distorção da Forma de Onda .....	18
2.2.5	Flutuações de Tensão .....	18
2.2.6	Variações na Freqüência dos Sinais do Sistema de Geração .....	19
2.3	Interrupções .....	19
2.3.1	Causas e Conseqüências das Interrupções .....	20
2.4	Afundamentos de Tensão .....	21
2.4.1	Causas e Conseqüências dos Afundamentos de Tensão .....	23
3.0	CONFIABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS .....	25
3.1	Terminologias .....	25
3.2	Principais Índices para Avaliação da Performance do Sistema .....	26
3.3	Níveis Hierárquicos da Confiabilidade .....	28
3.3.1	Confiabilidade na Geração .....	29
3.3.2	Confiabilidade na Transmissão.....	30
3.3.3	Confiabilidade na Distribuição.....	32
3.4	Modelos de Markov.....	32
3.5	Avaliação de Custos da Interrupção .....	36
4.0	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA .....	39
4.1	Variáveis Aleatórias .....	39
4.2	Funções Densidade de Probabilidade .....	39
4.3	Funções de Distribuição Acumulada.....	41
4.4	Funções Confiabilidade.....	41
4.5	Funções Taxa de Falha .....	42
4.6	Tipos de Distribuições.....	42
4.6.1	Distribuição de Poisson .....	43
4.6.2	Distribuição Exponencial.....	43
4.6.3	Distribuição Lognormal .....	45
4.6.4	Distribuição Weibull .....	45
5.0	DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE .....	48
5.1	Configuração dos Sistemas .....	48
5.2	Sistema Série.....	49
5.3	Sistema Paralelo .....	50
5.4	Sistema k de n .....	52
5.5	Sistema Misto .....	54
5.6	Redundâncias .....	54

5.6.1	Sistemas em <i>Load Sharing</i> .....	55
5.6.2	Sistemas em <i>Standby</i> .....	57
5.7	Diferenças entre Arranjos de Blocos de Confiabilidade e Topologia de Equipamentos de um Sistema Elétrico .....	59
6.0	AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ENERGIA DA VMZ-TM .....	61
6.1	A Empresa .....	61
6.2	O Sistema Elétrico da VMZ-TM .....	62
6.3	Análise das Distribuições do Sistema Elétrico VMZ-TM .....	65
6.4	Diagrama de Blocos de Confiabilidade do Sistema Elétrico VMZ-TM.....	69
6.5	Simulação Monte Carlo.....	70
6.6	Análise da Confiabilidade e Disponibilidade .....	74
6.7	Análise de Custo .....	76
7.0	CONCLUSÕES .....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## 1.0 INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação e Revisão da Literatura

Distúrbios na rede elétrica causados por afundamentos e interrupções momentâneas de tensão representam a grande maioria dos problemas de qualidade da energia enfrentados por consumidores industriais típicos, que utilizam cada vez mais equipamentos sofisticados em seus processos de controle. Interrupções nos processos industriais causados por esses distúrbios impactam de forma significativa a economia comercial devido ao elevado lucro cessante típico de indústrias de base e tecnologia. Nos Estados Unidos as perdas devido aos afundamentos e interrupções representam prejuízos anuais em torno de bilhões de dólares.

Os eventos de natureza aleatória característicos dos parâmetros de qualidade da energia, principalmente interrupções e afundamentos de tensão, influenciam de forma significativa a disponibilidade de um sistema elétrico. A importância do conhecimento desta disponibilidade vem motivando diversos estudos de confiabilidade, uma vez que consumidores e principalmente setores comerciais e industriais, estão cada vez mais sensíveis às perdas financeiras associadas à indisponibilidade do sistema elétrico.

O objetivo desta Monografia reside em avaliar a ocorrência dos eventos de interrupções e afundamentos de tensão em um sistema elétrico industrial, de modo a determinar a confiabilidade e disponibilidade deste sistema. A metodologia utilizada tem como objetivo avaliar também os custos da indisponibilidade e soluções alternativas para o aumento da confiabilidade e disponibilidade de forma a evitar o emprego de redundâncias de equipamentos e grandes modificações da topologia do sistema elétrico estudado.

## 1.2 Estrutura do Texto e Metodologias Utilizadas

O texto deste trabalho foi desenvolvido de forma a ordenar os passos para a elaboração de um estudo de confiabilidade de um típico sistema elétrico industrial. No capítulo 2 são abordados os parâmetros de qualidade da energia e sua importância no contexto industrial, em seguida são descritos os principais parâmetros de avaliação de qualidade da energia classificando-os em fenômenos transitórios, variações de longa e curta duração, fenômenos de distorção de forma de onda e flutuações de tensão. Os principais aspectos relativos às interrupções e afundamentos de tensão são abordados também neste capítulo.

No capítulo 3 são abordados os conceitos e terminologias relativos à confiabilidade em sistemas elétricos de potência e definidas as divisões, em níveis de confiabilidade, de um sistema elétrico e os principais índices para avaliação da performance deste sistema. O capítulo é finalizado com a apresentação dos modelos de Markov (Cadeias de Markov) para quantificar os estados e transições de um sistema elétrico e metodologias para quantificar os custos devido às interrupções de energia.

Os conceitos relativos às análises das variáveis aleatórias discretas ou contínuas e suas respectivas funções de distribuições são apresentadas no capítulo 4. Também são abordados os conceitos das principais funções da confiabilidade tal como a taxa de falha, tempo médio para falha e funções de distribuição acumulada.

A teoria para a representação de um sistema elétrico em diagramas de blocos de confiabilidade é apresentada no capítulo 5, assim como as possibilidades de configurações de blocos em série, paralelo e sistemas mistos ou complexos. Neste capítulo também é apresentada a teoria para configurações de redundâncias de blocos para aumento da confiabilidade total do sistema.

O último capítulo deste trabalho apresenta as características do sistema elétrico industrial estudado tais como o diagrama unifilar e dados de falhas dos equipamentos elétricos obtidos através de banco de dados de confiabilidade e dos

dados de vida deste sistema. Em seguida são elaborados os modelos das principais funções de distribuição (pdf's) associadas aos eventos de qualidade da energia (interrupções e afundamentos de tensão) e os diagramas de blocos de confiabilidade modelados a partir do diagrama unifilar do sistema industrial estudado.

A simulação de Monte Carlo para o diagrama de blocos de confiabilidade obtido é utilizada para obter os dados de disponibilidade e confiabilidade em diversos níveis hierárquicos do sistema elétrico. As análises de custos associados às ocorrências dos eventos de qualidade da energia são feitas de forma a conhecer o custo da não disponibilidade do sistema frente às ocorrências destes eventos. Também são realizadas as análises para melhoria da confiabilidade total do sistema.

## 2.0 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ENERGIA

Neste capítulo serão abordados os principais aspectos da importância do estudo de qualidade da energia em um sistema elétrico e o conhecimento dos seus principais parâmetros. Este conhecimento prévio é de suma importância para a determinação e garantia da confiabilidade de um sistema elétrico que será abordado nos próximos capítulos deste trabalho.

### 2.1 Importância do Estudo de Qualidade da Energia

O conceito de Qualidade da Energia é conhecido desde o final da década de 80 e teve grande relevância em estudos sobre distribuição de energia elétrica nos anos 90. O termo qualidade da energia possui uma íntima interação entre o sistema elétrico de potência e suas cargas (consumidores).

Perdas de produção nas indústrias ocasionadas por problemas de qualidade da energia possuem um impacto significativo na economia comercial, representando prejuízos anuais em torno de bilhões de dólares somente nos Estados Unidos. Os eventos típicos de qualidade da energia responsáveis por estes prejuízos residem basicamente em eventos que acontecem em períodos de tempos da ordem de 6 a 10 ciclos e queda de tensão na ordem de 50% da tensão nominal. Tais eventos na sua maioria são classificados como afundamentos de tensão e interrupção momentânea de tensão.

Os fenômenos (eventos) de um sistema elétrico atribuídos à qualidade da energia não são novos, porém, tiveram maior relevância devido a uma série de fatores conforme relacionado a seguir.

- A nova geração de equipamentos, principalmente os microprocessados e os que utilizam eletrônica de potência, são mais sensíveis aos distúrbios associados aos fenômenos de qualidade da energia do que os equipamentos

similares, principalmente os eletromecânicos, amplamente utilizados nas décadas passadas;

- O emprego da eletrônica de potência na grande maioria dos equipamentos do sistema elétrico e equipamentos domésticos causaram um aumento significativo nos níveis de distorção harmônica de corrente e conseqüentemente a distorção harmônica de tensão num sistema de distribuição;
- As margens de lucros cada vez menores nos diversos setores industriais bem como um maior conhecimento do comportamento de diversos parâmetros elétricos, advindos dos sistemas de monitoramento cada vez mais acessíveis para diversos tipos de consumidores, proporcionaram o aumento no interesse sobre o tema.

## 2.2 Definições sobre os Parâmetros de Qualidade da Energia

Diversos fenômenos eletromagnéticos que ocorrem em um sistema elétrico são atribuídos como terminologias de qualidade da energia, onde existe também na literatura científica certa ambigüidade entre os diversos termos existentes. Neste item serão descritos de forma sucinta os principais termos empregado em qualidade da energia, sendo que as definições sobre interrupção de longa e curta duração e afundamentos de tensão, foco deste trabalho, são descritos em maiores detalhes nos itens 2.3 e 2.4.

### 2.2.1 Fenômenos Transitórios

***Impulsos Transitórios:*** são fenômenos atribuídos especialmente às descargas atmosféricas, os impulsos típicos são da ordem de milhares de volts que ocorrem numa ordem de tempo de dezenas de microssegundos. Estes impulsos podem excitar freqüências naturais de um sistema de potência e causar oscilações transitórias.



**Oscilações Transitórias:** oscilações que possuem espectro cuja frequência fundamental é da ordem de quilohertz e duração de dezenas de microssegundos, sendo causadas principalmente pela energização de capacitores e cabos de potência.

### 2.2.2 Variações de Tensão de Longa Duração

**Sobretensão:** causam num sistema elétrico de potência o aumento de 110 por cento da tensão nominal numa duração superior a 1 minuto. São causadas pelo desligamento de grandes cargas num sistema elétrico ou pela energização de banco de capacitores, onde existe uma deficiência no controle ou na regulação de tensão.

**Subtensão:** análogo ao caso anterior, a subtensão ocorre devido à energização de grandes cargas e desligamento de banco de capacitores. Este fenômeno causa um decréscimo da tensão eficaz do sistema na ordem de 90 por cento com duração superior a 1 minuto.

### 2.2.3 Variações de Tensão de Curta Duração

**Swell:** o termo *Swell* é atribuído ao fenômeno de curta duração onde ocorre um aumento na tensão ou corrente eficaz de um sistema na ordem de 1,1 a 1,8 pu. A duração reside na faixa entre 0,5 ciclos a 1 minuto. São associados da mesma forma que nos afundamentos de tensão como sendo efeitos de faltas em um ponto específico de um sistema elétrico, contudo não são tão comuns quanto os afundamentos. São causados também, similarmente às sobretensões, por desligamentos de grandes cargas e energização de banco de capacitores.

## 2.2.4 Fenômenos Relativos à Distorção da Forma de Onda

**Harmônicos:** são sinais de frequências múltiplas da frequência fundamental de tensão ou corrente nominal fornecido pelo sistema de geração. São causados pela não-linearidade de cargas e por dispositivos eletrônicos que utilizam chaves estáticas. Os harmônicos são descritos completamente através de sua amplitude e ângulo de fase presente em um espectro harmônico. Também podem ser mensurados através do valor da distorção harmônica total, THD (*Total Harmonic Distortion*).

**Inter-harmônicos:** são sinais de tensão ou corrente que cujas frequências não são múltiplos inteiros da frequência fundamental fornecida pelo sistema de geração. A fonte de inter-harmônicos deve-se a dispositivos tais como os conversores estáticos de frequência, ciclo conversores, fornos de indução e dispositivos que utilizam arcos elétricos.

**Notching:** é caracterizado por um distúrbio periódico na onda de tensão causado pela operação normal de um dispositivo de eletrônica de potência quando a corrente deste é comutada de uma fase para outra.

**Ruído:** são sinais elétricos não desejados num sistema elétrico cuja banda espectral é menor que 200 kHz. Os ruídos são causados por cargas conectadas em retificadores de estado sólido, dispositivos que utilizam eletrônica de potência e fonte de tensão chaveada. Os ruídos são extremamente prejudiciais ao correto funcionamento de microcomputadores e PLC's.

## 2.2.5 Flutuações de Tensão

**Flicker:** o termo *Flicker* é utilizado para descrever o efeito de cintilação luminosa em lâmpadas, causado pela flutuação da tensão de alimentação destas. O *Flicker* é causado principalmente por fornos elétricos a arco.

## 2.2.6 Variações na Frequência dos Sinais do Sistema de Geração

É definido como um desvio da frequência fundamental de geração de 50 ou 60 hertz. A frequência dos sinais do sistema de geração é diretamente relacionada à velocidade de rotação dos geradores, onde existe normalmente uma pequena variação devido às características do sistema de controle da geração e alterações de cargas conectadas ao sistema. Variações anormais, apesar de remotas, são causadas por uma grande quantidade de cargas sendo desconectada do sistema, faltas nos sistemas de transmissão e pelo desligamento de uma grande quantidade de geração de energia. A medida que um sistema elétrico torna-se mais robusto, isto é, possua uma malha de interligação ampla, este fenômeno torna-se mais raro.

## 2.3 Interrupções

As interrupções assim como os afundamentos de tensão são fenômenos aleatórios causados principalmente por falhas em equipamentos, faltas no sistema de potência (curto circuitos) e problemas diversos nos sistemas de controle. É caracterizado pelo decréscimo de tensão ou corrente abaixo de 0.1 pu com duração superior a 1 minuto. Algumas interrupções são procedidas de afundamentos em outros pontos do sistema elétrico, com duração determinada entre o tempo da falha e a atuação da proteção para eliminar esta falha.

As interrupções basicamente são divididas entre longa e curta duração, sendo que existem algumas divergências entre normas européias e americanas tais como EN 50160, IEC 61000 e IEEE Std. 859-1987, IEEE Std. 1159-1995 e IEEE Std. 1250-1995 acerca deste conceito. Neste trabalho o conceito adotado é baseado na norma IEEE Std. 859-1987 onde a classificação entre curta e longa duração não diz respeito à duração da interrupção, mas ao processo de eliminação da interrupção que pode ser manual ou automático, através de religadores, conforme a seguir:

- **Interrupções de Curta Duração:** decréscimo de tensão ou corrente abaixo de 0.1 pu com eliminação da interrupção e restabelecimento do sistema através de controle automático;
- **Interrupções de Longa Duração:** decréscimo de tensão ou corrente abaixo de 0.1 pu com intervenção manual para eliminar a interrupção e restabelecer o sistema.

Estudos sobre predição estocástica de interrupções em um sistema elétrico pode ser obtidos através do conhecimento de alguns parâmetros do sistema tais como (BOLLEN, 2000, p. 136):

- Taxa de falha por distância (usualmente km) do alimentador principal e derivações;
- Distância total do sistema principal de alimentação e derivações;
- Posições no sistema dos religadores e dispositivos de proteção;
- Taxa de sucesso para os religamentos (primeiro religamento, segundo religamento e etc).

### 2.3.1 Causas e Conseqüências das Interrupções

Este item detalha com maior profundidade as causas das interrupções de tensão ou corrente em um sistema elétrico e as conseqüências advindas destas interrupções neste sistema. Em relação às interrupções de longa duração pode-se verificar que:

- Falhas em equipamentos, curtos-circuitos, descargas atmosféricas e sobrecargas, conforme descrito anteriormente, atua o sistema de proteção que, dependendo da topologia deste sistema, pode levar a uma interrupção aos consumidores caso não haja sistemas redundantes e a distribuição seja do tipo radial;
- Uma falha na operação de um dispositivo de proteção, tal como um relé, em um sistema sem redundância similar ao caso anterior, ocasiona também uma

interrupção neste sistema. A confiabilidade de todo o sistema é bastante afetada por falhas aleatórias em relés de proteção;

- Operação errada devido principalmente à inexperiência, falhas de treinamentos e transgressões às normas operacionais de um sistema elétrico podem ocasionar interrupções no sistema. Estas falhas geralmente são comuns durante os períodos de manutenções preventivas.

Em relação às conseqüências causadas pela interrupção os seguintes efeitos são observados nos equipamentos:

**Motores de Indução:** com um nível nulo de tensão o motor perde velocidade e causa variações no processo. Em geral pode ser religado quando a tensão volta ao normal mesmo quando ainda em baixa rotação.

**Motores Síncronos:** os motores síncronos em geral não podem ser religados assim como os motores de indução após uma interrupção, causando maiores problemas de paradas e prejuízos para o processo produtivo.

**Inversores de Frequência:** os inversores de frequência são muito sensíveis às variações de tensão e conseqüentemente causam efeito de parada nos processos assim como os motores síncronos.

**Equipamentos Eletrônicos:** similar ao caso dos inversores a eletrônica embarcada nestes equipamentos não suportam variações e interrupções de tensão causando a parada. Em geral baterias ou *no-breaks* são utilizados para mitigar tais efeitos.

## 2.4 Afundamentos de Tensão

Similarmente ao caso das interrupções, o afundamento de tensão também se caracteriza por ser um evento aleatório e com causa atribuída a eventos de falhas em equipamentos, operações indevidas no sistema elétrico, partida de grandes cargas tais como motores, dentre outros (BOLLEN, 2000). Os afundamentos de

tensão causam diversos problemas na operação de um sistema elétrico, a figura 2.1 ilustra uma representação da susceptibilidade de diversas cargas de um sistema elétrico frente às características de magnitude e duração dos afundamentos de tensão.

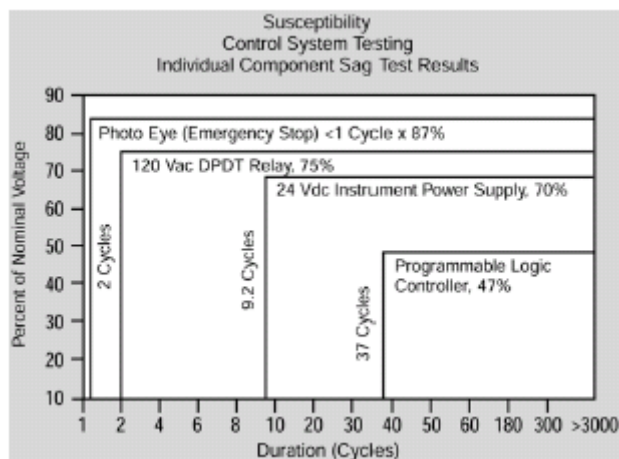


Figura 2.1 – Susceptibilidade de cargas para os eventos de afundamento de tensão.  
FONTE: (SILVA et al., 2006).

O afundamento de tensão é caracterizado pelo decréscimo entre 0,9 a 0,1 pu da tensão nominal com duração entre 0,5 ciclos a 1 minuto. O histograma tridimensional da figura 2.2 caracteriza os principais tipos de afundamentos de tensão durante uma amostragem anual de eventos.

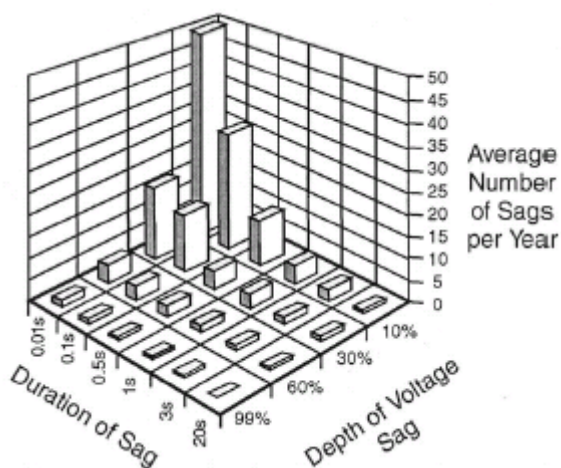


Figura 2.2 – Histograma tridimensional para os eventos de afundamento de tensão para uma amostragem de um ano.  
FONTE: (SILVA et al., 2006).

Na grande maioria das vezes o trabalho para eliminar as ocorrências dos afundamentos de tensão requer grandes investimentos no setor elétrico, o que direciona a solução para a mitigação destes afundamentos nas principais cargas utilizando tecnologias apropriadas.

### 2.4.1 Causas e Conseqüências dos Afundamentos de Tensão

Problemas de natureza física na rede de distribuição tornam inevitável a ocorrência de afundamentos e interrupções de tensão, apesar dos esforços adotados pelas concessionárias de energia elétrica. Condições do tempo, galhos de árvores, contato de animais, falhas na isolação ou atividade humana, possibilitam a ocorrência de afundamento de tensão devido principalmente às faltas fase-terra, fase-fase e mais raramente faltas trifásicas.

Um pequeno número de consumidores próximo da falta irá perceber um afundamento severo de tensão seguido de uma interrupção quando ocorre a operação do religador da concessionária. Entretanto a grande maioria dos consumidores conectados em outros alimentadores irá perceber um afundamento de tensão com a amplitude determinada pela distância do consumidor ao ponto de falta. A duração do afundamento será determinada pelos tempos de operação da proteção e dos dispositivos de manobra tais como: disjuntores, religadores e chaves fusíveis. Esses consumidores estarão isolados pela presença de vários transformadores entre a falta e os consumidores. A presença dos transformadores, com suas respectivas impedâncias, é que irão diminuir a profundidade do afundamento visto pela maioria dos consumidores.

A predição estocástica de afundamentos de tensão é extremamente importante para o conhecimento da compatibilidade operacional de um determinado equipamento com o sistema no qual é conectado. Basicamente três informações são necessárias para este estudo, a saber:

- **Obtenção da Performance do Sistema:** através de um sistema de monitoramento adequado para aquisição dos eventos de afundamentos, os dados obtidos num determinado ponto do sistema elétrico devem ser classificados para serem utilizados em futuras análises;
- **Tolerância do Equipamento ao Afundamento de Tensão:** através de testes ou informações do fabricante o comportamento na operação do equipamento deve ser analisado frente aos diversos afundamentos obtidos no item anterior;
- **Determinar os Impactos Esperados:** através das duas informações obtidas anteriormente é possível estimar o número de equipamentos que não irão desempenhar as funções. Números de falhas por ano e aspectos financeiros devem ser obtidos nestas análises.

As conseqüências dos afundamentos de tensão são similares para o caso da interrupção, em geral motores, inversores e dispositivos eletrônicos são os equipamentos mais vulneráveis a este tipo de evento.



## 3.0 CONFIABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS

O crescente interesse, principalmente econômico, nos estudos sobre a influência dos parâmetros de qualidade da energia no fornecimento de energia elétrica e estabilização dos processos industriais possibilitou o crescimento da aplicação dos estudos de confiabilidade em sistemas elétricos de potência. Outro fator contribuinte para este crescimento foi o desenvolvimento tecnológico de computadores com maior velocidade de processamento possibilitando o desenvolvimento de algoritmos de simulação mais complexos para avaliação da confiabilidade em sistemas elétricos.

Neste capítulo um resumo sobre as principais definições sobre a avaliação da confiabilidade em sistemas elétricos será feito de forma a apoiar a teoria de confiabilidade nos capítulos 4 e 5.

### 3.1 Terminologias

Alguns termos usualmente empregados de forma semelhante em engenharia possuem diferenças importantes quando utilizados na avaliação da confiabilidade de sistemas elétricos. Demais termos particulares da teoria da confiabilidade podem ser consultados no glossário deste trabalho. Os termos que devem ser diferenciados quando tratados pela confiabilidade em sistemas elétricos são descritos a seguir:

- **Falha:** termo utilizado quando um componente, equipamento ou sistema não desempenha a função principal na qual foi projetado. Um exemplo de falha pode ser relacionado à não operação de um relé de proteção quando ocorre uma sobrecorrente. Existe uma diferença sutil entre o conceito de falha e defeito. Um defeito em um componente ou equipamento não ocasiona a perda da função principal. Por exemplo, um *led* de indicação queimado não implica na falha propriamente dita do relé, pois o *led* indicador do relé não ocasiona a não operação do relé frente a uma sobrecorrente.

- **Parada do Sistema Elétrico:** a parada de um sistema elétrico nem sempre é creditada a uma falha. A parada representa o desligamento de um equipamento primário de um sistema elétrico, como por exemplo, um transformador ou um gerador. Existem paradas decorrentes de uma falha e também decorrentes de ações de manutenção preventiva. Neste último caso denomina-se paradas programadas. Uma falha em um determinado componente de um transformador pode desencadear uma parada programada para a manutenção.
- **Interrupção:** a interrupção é a consequência da parada de um sistema elétrico, a interrupção ocasiona o não fornecimento de energia aos consumidores ou a um processo produtivo.

### 3.2 Principais Índices para Avaliação da Performance do Sistema

Determinados índices de performance de um sistema elétrico podem ser utilizados para avaliar a confiabilidade no fornecimento de energia aos consumidores, a norma IEEE Std-1366 denominada *Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*, fornece diversos índices de confiabilidade relacionados à distribuição de energia, ver referência [6]. A principal característica relacionada a um evento estocástico reside na determinação do tempo de ocorrência entre tais eventos, sendo a interrupção um dos principais parâmetros de qualidade da energia, será abordado neste item alguns dos principais índices de performance de um sistema elétrico relacionados aos eventos estocásticos atribuídos às interrupções de tensão.

Um dos principais índices utilizados pela maioria das concessionárias reside na determinação do número médio de interrupções sofridas por consumidor no período de um ano, dado por (3.1), este indicador é conhecido como SAIFI (*System average interruption frequency index*) [6].

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^K N_i}{N_{tot}} \quad (3.1)$$

Sendo:

- K: número total de paradas de um sistema elétrico no período de um ano, cada parada pode afetar um ou mais consumidores;
- $N_i$ : número de consumidores afetados pela  $i$ -ésima parada do sistema elétrico;
- $N_{tot}$ : número total de consumidores alimentados pela concessionária.

Um outro índice de suma importância para a avaliação da confiabilidade de um sistema elétrico reside no cálculo da indisponibilidade média, em minutos, por consumidor num período de um ano, o cálculo é dado por (3.2). Este indicador também é conhecido como SAIDI (*System average interruption duration index*) [6].

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^K N_i D_i}{N_{tot}} \quad (3.2)$$

Sendo:

- $D_i$ : duração, em minutos, da  $i$ -ésima parada do sistema elétrico.

A duração média das interrupções em um ano, também conhecida como CAIDI (*Customer average interruption duration index*) [6], pode ser calculada pela razão entre (3.1) e (3.2) conforme dado por (3.3) e (3.4).

$$\bar{D} = \frac{\bar{q}}{\lambda} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (3.3)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^K N_i D_i}{\sum_{i=1}^K N_i} \quad (3.4)$$

Do ponto de vista do consumidor a expressão dada em (3.4) é utilizada, contudo, do ponto de vista da concessionária a expressão dada por (3.5) é mais adequada para avaliar o impacto da duração média das interrupções em um ano.

$$D_{\text{int}} = \frac{\sum_{i=1}^K D_i}{K} \quad (3.5)$$

Diversos outros índices podem ser calculados. Conforme visto anteriormente, a referência [6] apresenta diversos tipos de indicadores relacionados aos tipos de interrupções, carga, sistema e consumidores. Alguns destes índices são reportados a seguir:

- CTAIDI (*Customer total average interruption duration index*);
- CAIFI (*Customer average interruption frequency index*);
- ASAI (*Average service availability index*);
- CEMIn (*Customers experiencing multiple interruptions*);
- ASIFI (*Average system interruption frequency index*);
- ASIDI (*Average system interruption duration index*);
- MAIFI (*Momentary average interruption frequency index*);
- MAIFIE (*Momentary average interruption event frequency index*);
- CEMSMIn (*Customers experiencing multiple sustained interruption and momentary interruption events*).

### 3.3 Níveis Hierárquicos da Confiabilidade

Um sistema elétrico pode ser dividido em três partes funcionais, a saber, geração, transmissão e distribuição, cada qual com suas particularidades funcionais e operacionais. Na teoria da confiabilidade em sistemas elétricos um raciocínio similar pode ser utilizado. Os níveis a seguir são denominados de níveis hierárquicos da confiabilidade em sistemas elétricos.

- Geração (Nível I);
- Geração e Transmissão (Nível II);
- Geração, Transmissão e Distribuição (Nível III).

Nesta classificação, os níveis II e III inserem em seus níveis particularidades dos níveis anteriores. As secções a seguir abordam sucintamente particularidades destes níveis de confiabilidade.

### 3.3.1 Confiabilidade na Geração

O nível hierárquico de confiabilidade I possui uma característica em que as paradas nos sistemas de geração não obrigatoriamente implicam em indisponibilidade do setor elétrico para o consumidor localizado no nível III. Esta característica deve-se ao planejamento da geração de energia através de interligação entre malhas, possibilitando uma disponibilidade maior aos clientes.

Alguns aspectos operacionais e de projetos nos sistemas de geração são vitais para manter um nível aceitável de disponibilidade da geração, estes aspectos relacionam-se aos seguintes itens:

***Demanda Máxima Anual:*** o principal estudo de confiabilidade no nível I reside em determinar a probabilidade da capacidade de geração ser inferior ao pico máximo de demanda anual, este estudo geralmente é feito para um tempo futuro de 7 anos de forma a estabelecer critérios de projetos e planejamento de operação dos sistemas de geração. Esta probabilidade é conhecida como expectativa de perda de carga ou LOLE (*loss of load expectation*), sendo os tempos para manutenções corretivas (MTTR) o parâmetro usual para cálculo deste indicador.

***Programa de Manutenções Preventivas:*** ações preventivas são de suma importância para a garantia da confiabilidade de geração no nível I, uma vez que tais ações reduzem a quantidade de manutenções corretivas, contudo os programas de manutenções preventivas afetam também a disponibilidade do sistema devido à

necessidade de paradas no sistema elétrico para as intervenções. As manutenções preventivas, diferentemente das manutenções corretivas, não são de natureza aleatória, uma vez que o tempo para a parada é determinístico e estabelecido pelo programa anual de manutenção.

**Curva de Duração de Carga:** a indisponibilidade de geração não pode ser quantificada unicamente pelo indicador LOLE, uma vez que este é uma medida do risco para o não atendimento de uma demanda máxima de geração anual. A curva de duração de carga é utilizada juntamente com os dados de frequência de paradas do sistema, funções de distribuição para o tempo de reparo e programas de manutenção preventiva, de forma a estabelecer um conhecimento mais aprofundado sobre a disponibilidade de geração no nível I.

### 3.3.2 Confiabilidade na Transmissão

O estudo da confiabilidade do nível II é mais complexo do que o nível I e basicamente refere-se aos estudos de confiabilidade de cabos elétricos e torres de transmissão. Os seguintes itens abordam algumas das particularidades do estudo de confiabilidade em transmissão de energia.

**Sobretensão em Linhas de Transmissão:** as interrupções em uma linha de transmissão causam sobretensões nas demais linhas do sistema devido ao aumento do fluxo de potência ativa e reativa. Um estudo de fluxo de potência deve ser feito para cada falha no sistema de transmissão de modo a estudar as sobretensões nas demais linhas e conseqüentemente a disponibilidade de todo o sistema de transmissão.

**Confiabilidade na Proteção:** as proteções num sistema de transmissão são vitais para que maiores danos ao sistema sejam evitados. No estudo de confiabilidade da proteção do sistema de transmissão devem ser analisados os seguintes itens:

- Falha na proteção durante uma falta;

- Operação da proteção quando não existe uma falta;
- Operação da proteção devido à atuação de uma outra proteção;
- Operação da proteção devido à ocorrência de um outro evento no sistema elétrico.

**Paradas do Sistema Devido às Intempéries:** um dos principais modos de falha nos sistemas de transmissão deve-se às paradas de linhas de transmissão devido às intempéries. A norma do IEEE relativa à coleta de dados de paradas distingue três tipos de taxa de falha em relação à variação climática, conforme mostrado a seguir:

- Tempo normal;
- Tempo adverso;
- Tempestades.

A tabela 3.1 mostra alguns dados relativos às causa de falha num sistema de transmissão do Reino Unido.

Tabela 3.1 – Dados sobre causa de falhas num sistema de transmissão de um setor de utilidades do Reino Unido.

Causa das Paradas	Sistema de Transmissão	Sistema de Distribuição
Descargas atmosféricas	9%	12%
Neve	52%	11%
Ventos fortes	32%	7%
Falha em usinas	5%	39%
Interferência de linhas	2%	21%
Choque entre passáros ou animais	-	8%
Cargas adjacentes	-	2%

### 3.3.3 Confiabilidade na Distribuição

O crescente interesse nos estudos de confiabilidade para o terceiro nível hierárquico da confiabilidade em sistemas elétricos advém da preocupação de clientes e consumidores em relação às conseqüências da indisponibilidade do sistema elétrico nos processos produtivos e nas cadeias de serviços.

A confiabilidade na distribuição depende, dentre outros fatores, do tipo de configuração deste sistema que pode ser de dois tipos:

- Sistemas radiais;
- Sistemas em rede.

No sistema radial a carga é conectada através de um único caminho até a fonte de energia, desta forma, uma falha em qualquer componente deste sistema irá causar uma interrupção no suprimento de energia. No sistema em rede existem diversos caminhos que conectam uma carga à fonte de energia de modo que nem sempre uma falha em um componente poderá levar a uma interrupção no suprimento de energia. Os métodos matemáticos para cálculo da confiabilidade também são diferentes conforme o tipo de distribuição adotado.

Um outro aspecto de suma importância reside na determinação dos tempos de interrupção no sistema de distribuição. Os custos associados aos tempos de interrupção crescem de forma não linear, sendo que tais tempos são fortemente influenciados por diversos aspectos operacionais tais como tempo para encontrar a falha e tempos para tomada de ações corretivas.

## 3.4 Modelos de Markov

Um equipamento ou sistema pode apresentar diversos estados ou transições de estados operacionais, tais estados ou transições podem ser modelados por meio de um diagrama de estados (BOLLEN, 2000). A figura 3.1 mostra um exemplo de um



diagrama de estados para um motor elétrico que para este caso apresenta dois estados e duas transições operacionais.

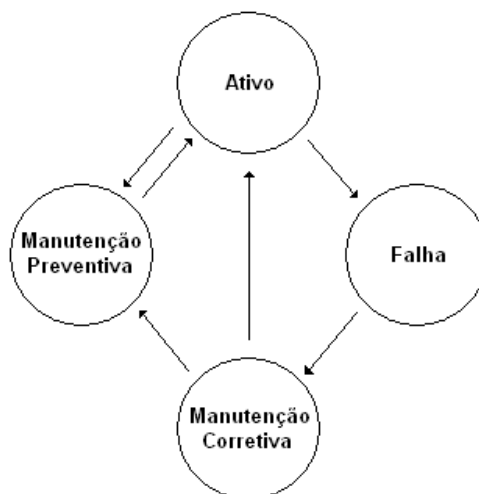


Figura 3.1 – Diagrama de estados para um motor elétrico.  
FONTE: (BOLLEN, 2000).

Os dois estados operacionais do diagrama da figura 3.1 são classificados em: Ativo (disponível para a operação) e Falha (não disponível para a operação). As transições são classificadas em Manutenção Corretiva e Manutenção Preventiva, em ambas as transições o motor elétrico não está disponível para operação. Observa-se também que quando o motor está em transição de estado de Manutenção Corretiva ou Preventiva o mesmo não muda para o estado de Falha, contudo pode mudar da transição Corretiva para a Preventiva.

Uma maneira de calcular probabilidades de estados ou transições pode ser obtida através dos modelos de Markov (BOLLEN, 2000). Esta metodologia assume dois pré-requisitos. O primeiro diz respeito ao fato de que no modelo de Markov o sistema não apresenta memória, ou seja, a probabilidade futura de um estado é função de um estado atual e não de acontecimentos prévios ocorridos neste estado. O segundo pré-requisito reside no fato do sistema ser homogêneo, ou seja, as probabilidades de estados ou transições são constantes no tempo. Os dois tipos de modelos de Markov são descritos a seguir:

- Modelos Discretos ou Cadeias de Markov;

- Processos Contínuos de Markov.

No modelo discreto (Cadeias de Markov) os estados ou transições ocorrem em intervalos de tempo discretos definidos também como estágios. A figura 3.2 ilustra uma cadeia de Markov descrita para um componente com dois estados (A - Ativo e F - Falha) modelado em três intervalos de tempos. Neste exemplo o componente quando em estado ativo possui probabilidade de 0.1 para mudar para o estado de falha e conseqüentemente 0.9 para permanecer no estado ativo. Quando em estado de falha o componente possui probabilidade de 0.6 para mudar para o estado ativo e 0.4 para continuar em falha. Ao final do terceiro estágio de tempo as probabilidades possíveis são calculadas através da multiplicação entre as diversas combinações de probabilidades dos estados.

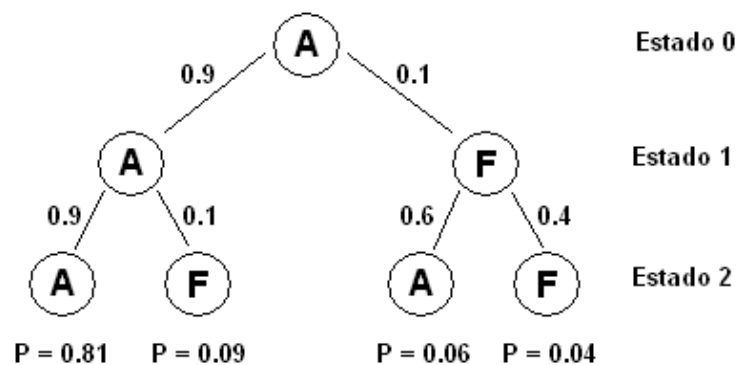


Figura 3.2 – Exemplo de uma cadeia de Markov com 3 estágios.  
FONTE: (BROWN, 2002).

Para os processos contínuos o modelo de Markov assume intervalos de tempo diferentes do caso da cadeia de Markov onde os intervalos são constantes. Uma representação para um modelo contínuo de um componente com dois estados (A - Ativo e F - Falha) e taxas de falha  $\lambda$  (transição entre o estado Ativo para Falha) e reparo  $\mu$  (transição entre estado de Falha para Ativo) é dado pela figura 3.3.

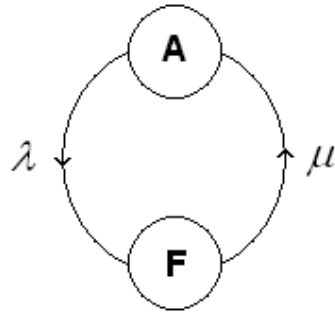


Figura 3.3 – Modelo de Markov para um componente com dois estados.

A probabilidade para os estados Ativo ou em Falha do componente, para qualquer tempo  $t$ , é igual a 1 (100%), conforme dado por 3.6.

$$p_A + p_F = 1 \quad (3.6)$$

Para um dado intervalo de tempo  $t + \Delta t$ , a probabilidade de um equipamento encontrar-se num estado ativo é igual a probabilidade  $p_A$  do equipamento encontrar-se no estado ativo em  $t$  somado com a probabilidade do equipamento sair do estado de falha para o ativo num intervalo de tempo  $\Delta t$  e subtraído da probabilidade deste mesmo equipamento transitar do estado ativo para o estado de falha no intervalo  $\Delta t$ , conforme equação 3.7, o mesmo raciocínio é utilizado para calcular a probabilidade do equipamento em falha  $p_F$  no mesmo intervalo  $t + \Delta t$ .

$$\begin{aligned} p_A(t + \Delta t) &= p_A - p_A \lambda \Delta t + p_F \mu \Delta t \\ p_F(t + \Delta t) &= p_F - p_F \mu \Delta t + p_A \lambda \Delta t \end{aligned} \quad (3.7)$$

Derivando as equações em relação ao tempo, obtém-se as equações diferenciais dadas por 3.8 e 3.9.

$$\frac{dp_A}{dt} = -\lambda p_A + \mu p_F \quad (3.8)$$

$$\frac{dp_F}{dt} = -\mu p_F + \lambda p_A \quad (3.9)$$

A solução das equações acima para as probabilidades  $p_A$  e  $p_F$  em estado permanente é obtida por 3.10 e 3.11 respectivamente.

$$p_A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.10)$$

$$p_F = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.11)$$

Para modelos de Markov com grandes números de componentes utilizam-se equações diferenciais matriciais conforme 3.12, onde A representa a matriz de estados e P a matriz da probabilidade de estados. Maiores detalhes sobre as equações diferenciais de estados podem ser consultadas na secção 2.5.4 da referência [2].

$$\frac{d\bar{P}}{dt} = A\bar{P}(t) \quad (3.12)$$

### 3.5 Avaliação de Custos da Interrupção

Os eventos de qualidade da energia, especialmente interrupções de energia, quando presentes em centros consumidores ou produtivos ocasionam efeitos que resultam em indisponibilidade de um equipamento ou variações de parâmetros de processos. Tais eventos impactam de forma expressiva nas receitas de qualquer empreendimento. Os custos devidos às ocorrências destes tipos de eventos podem ser classificados de diversas formas conforme mostrado a seguir.

**Custos Diretos por Interrupção:** são custos atribuídos diretamente à ocorrência do evento, exemplos de custos diretos são os relacionados às perdas de produção, custos de manutenção, custos de materiais, serviços e etc. A expressão 3.13 quantifica o custo associado à manutenção corretiva de um equipamento após um evento de qualidade da energia cujo efeito resultou em uma indisponibilidade de um

equipamento. A constante  $K_C$  desta expressão representa o custo associado a uma parada do equipamento, o número de paradas deste equipamento é obtido através do cálculo da integral, num intervalo de tempo  $T$ , da função taxa de falhas  $\lambda(t)$ , que relaciona à parada do equipamento devido a um evento de qualidade da energia.

$$C_{mc} = K_C \int_0^T \lambda(t) dt \quad (3.13)$$

O custo da manutenção corretiva por hora de ser obtido facilmente através da expressão 3.14.

$$C_{mc} / hora = \frac{K_C}{T - t_0} \int_0^{T-t_0} \lambda(t) dt \quad (3.14)$$

**Custos Indiretos por Interrupção:** os custos indiretos na grande maioria das vezes não são fáceis de mensurar uma vez que estes não possuem uma relação direta com o evento de qualidade da energia. Um exemplo de custos indiretos pode ser associado à perda de mercado (*market share*), impactos ambientais e etc.

**Custos por Demanda Interrompida:** os custos devido à demanda interrompida (3.15) é determinado através da relação entre os custos da demanda interrompida por centro consumidor  $C_i(d)$ , em função do tempo da interrupção  $d$ , pela demanda interrompida total  $L_i$  do  $i$ -ésimo consumidor  $C_i$ .

$$C_{i\_kw} = \frac{\sum_i C_i(d)}{\sum_i L_i} \quad (3.15)$$

**Custos por Energia não Fornecida:** uma variação da expressão (3.15) pode ser feita para determinar os custos devido à energia interrompida conforme dado por (3.16).

$$C_{nd\_kWh} = \frac{\sum_i C_i(d)}{d \cdot \sum_i L_i} \quad (3.16)$$

**Custos x Confiabilidade da Instalação:** o gráfico da figura 3.4 é muito utilizado para estabelecer o ponto de equilíbrio para os custos investidos em confiabilidade nas instalações e operações (linha pontilhada) em função dos custos devido a não confiabilidade das instalações (linha tracejada). Nesta figura quanto menor for o nível de confiabilidade das instalações e operações maiores serão os custos (lucro cessante) associados às indisponibilidades do sistema elétrico devido à ocorrência de eventos de qualidade da energia.

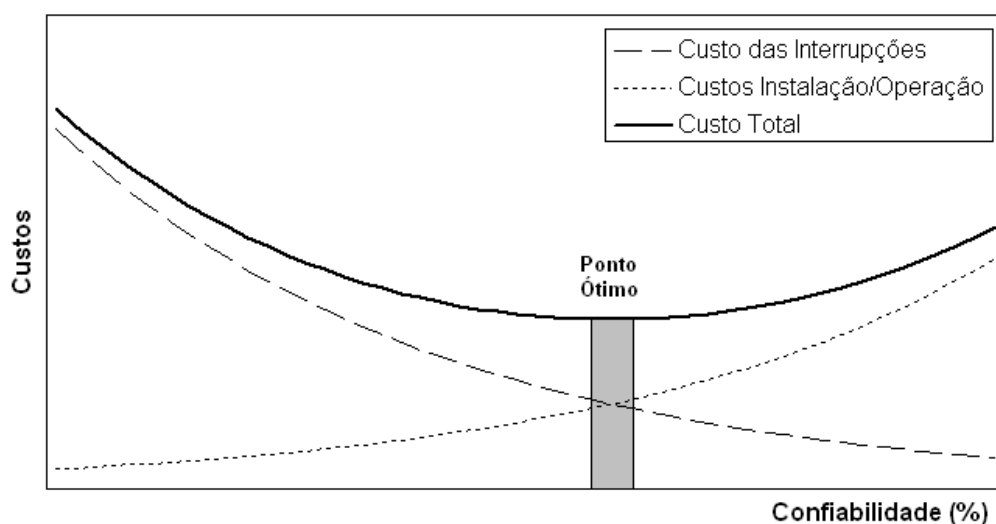


Figura 3.4 – Curvas de custos para a indisponibilidade versus confiabilidade.

## 4.0 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

As funções densidade de probabilidade, pdf, (*Probability Density Functions*), denotado por  $f(x)$ , representam as funções estatísticas mais utilizadas na engenharia da confiabilidade e na análise de dados de vida. Estas funções podem assumir variáveis aleatórias discretas ou contínuas.

### 4.1 Variáveis Aleatórias

As variáveis aleatórias discretas são aquelas onde o parâmetro a ser medido só pode assumir determinados valores inteiros, sendo a sua distribuição de probabilidade denominada de distribuição discreta. Como exemplo desta distribuição, poderíamos citar a distribuição do número de defeitos em um determinado componente.

Variáveis contínuas são aquelas onde o parâmetro medido é expresso em uma escala contínua, sendo a sua distribuição de probabilidade denominada de distribuição contínua. Exemplo desta distribuição é aquela relacionada à probabilidade de tempos de falha de um equipamento.

### 4.2 Funções Densidade de Probabilidade

Conforme visto anteriormente as distribuições de probabilidade, assim como as variáveis aleatórias, podem assumir valores discretos ou contínuos. A figura 4.1 ilustra uma distribuição discreta onde cada valor discreto de  $x_i$  (eixo das abscissas) assume uma probabilidade de ocorrência dado por (4.1) no eixo das ordenadas.

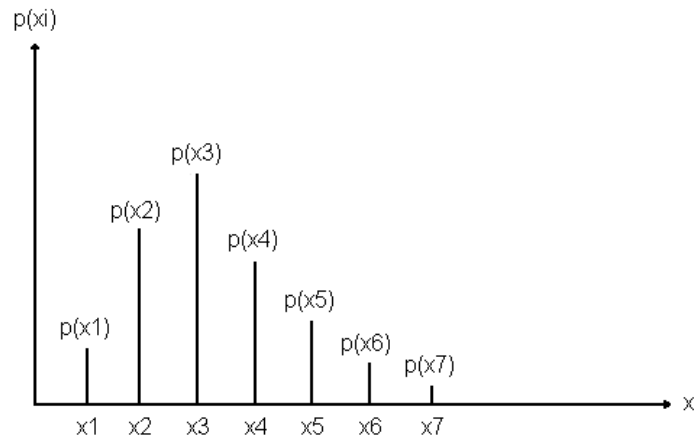


Figura 4.1 – Densidade de probabilidade discreta.

$$P\{X = x_i\} = p(x_i) \quad (4.1)$$

A distribuição contínua apresenta uma aparência de uma curva suave conforme figura 4.2, a probabilidade da variável contínua  $x$  estar no intervalo entre  $a$  e  $b$  é dado por (4.2).

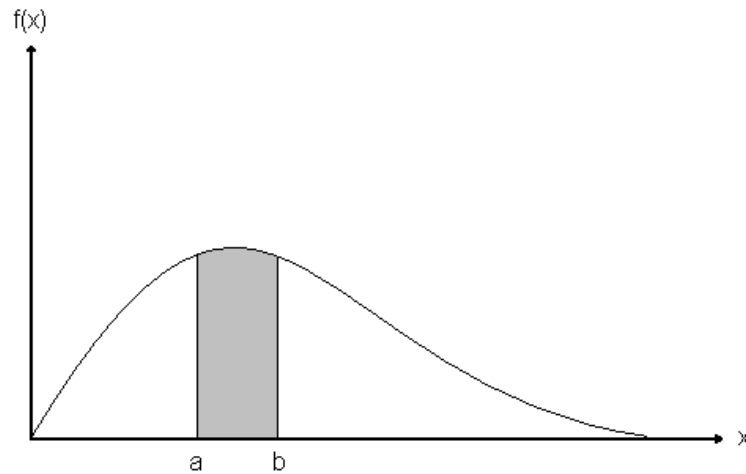


Figura 4.2 - Densidade de probabilidade contínua.

$$P\{a \leq X \leq b\} = \int_a^b f(x)dx \quad (4.2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (4.3)$$



### 4.3 Funções de Distribuição Acumulada

A função de distribuição acumulada, cdf, (*Cumulative Distribution Function*), denotado por  $F(x)$ , representa a probabilidade de ocorrência de um evento no valor de  $x$ . O valor da cdf é calculado através de (4.3). A pdf pode ser derivada da cdf através da expressão dada em (4.5).

$$F(x) = P\{x \leq c\} = \int_{0, -\infty}^c f(x) dx \quad (4.4)$$

$$f(x) = \frac{d(F(x))}{dx} \quad (4.5)$$

### 4.4 Funções Confiabilidade

A função confiabilidade, i.e, probabilidade de não ocorrência de um evento falha, pode ser calculada através da cdf da função falha  $f(t)$ , onde a variável aleatória contínua  $x$  é substituída pela variável contínua tempo até a falha ( $t$ ), conforme dado em (4.6).

$$\begin{aligned} F(t) + R(t) &= 1 \\ R(t) &= 1 - F(t) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Reciprocamente a função densidade de probabilidade  $f(t)$  pode ser derivada da função confiabilidade  $R(t)$  conforme (4.7).

$$f(t) = -\frac{d(R(t))}{dt} \quad (4.7)$$

## 4.5 Funções Taxa de Falha

Uma outra função muito utilizada em engenharia da confiabilidade é a função taxa de falhas, esta função representa o número de falha esperado entre os tempos  $t$  e  $t+\Delta t$ , dado que nenhuma falha tenha ocorrido até o tempo  $t$ . A função taxa de falhas também é conhecida como taxa de falha condicional ou função de risco (*hazard rate*),  $h(t)$ . O cálculo da taxa de falha é dado por (4.8).

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.8)$$

## 4.6 Tipos de Distribuições

Existem, na matemática, inúmeros tipos de distribuições estatísticas, tanto discreta quanto contínua. As distribuições a seguir são as mais utilizadas na teoria da confiabilidade.

Principais tipos de distribuições discretas:

- Distribuição Hipergeométrica;
- Distribuição Binomial;
- Distribuição de Poisson.

Principais distribuições contínuas:

- Distribuição Normal;
- Distribuição Lognormal;
- Distribuição Exponencial;
- Distribuição Weibull;
- Distribuição Weibull mista;
- Distribuição Gama Generalizada.

Neste trabalho serão utilizados somente os seguintes tipos de distribuições dentre discretas e contínuas:

- Distribuição de Poisson;
- Distribuição Lognormal;
- Distribuição Exponencial;
- Distribuição Weibull.

#### 4.6.1 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é muito utilizada quando é necessário determinar a probabilidade de ocorrência de  $x$  falhas em um determinado período de tempo  $t$ , para uma taxa de falhas  $\lambda$  (falhas/tempo). A distribuição de Poisson é dada por (4.9).

$$P(x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t} \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (4.9)$$

Um exemplo típico do emprego da distribuição de Poisson reside em se determinar a probabilidade de ocorrência de duas falhas em um transformador de 10MVA em 1 ano, sabendo que a taxa de falha deste transformador é igual a 0,0153 (falhas/ano), tem-se:

$$P(2) = \frac{(0,0153 \cdot 1)^2}{2!} e^{-0,01531} = 117,05 \cdot 10^{-6} \cdot 0,985 = 0,012\% \quad (4.10)$$

#### 4.6.2 Distribuição Exponencial

Uma das distribuições mais conhecidas e utilizadas devido à sua simplicidade é a distribuição exponencial. Sua pdf é matematicamente descrita por (4.11).

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (4.11)$$

A função confiabilidade (4.12), taxa de falha (4.13) e o MTTF (*Mean Time to Failure*) (4.14) podem ser derivadas de (4.11) conforme a seguir.

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) = 1 - \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda s} ds \\ R(t) &= 1 - [1 - e^{-\lambda t}] \\ R(t) &= e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Conforme observado em (4.13) a taxa de falha para qualquer distribuição exponencial é sempre constante e igual ao próprio valor de lambda ( $\lambda$ ).

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} \\ \lambda(t) &= \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \end{aligned} \quad (4.13)$$

O tempo médio para falhar ou MTTF é facilmente obtido através do cálculo do valor médio da pdf da distribuição exponencial, conforme (4.14).

$$\begin{aligned} MTTF &= \mu = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \\ MTTF &= \int_0^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt \\ MTTF &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Nota-se que para a distribuição exponencial o valor de MTTF é sempre igual ao inverso da taxa de falha.

### 4.6.3 Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal (4.15) é muito utilizada para modelar modos de falhas devido a fadiga e *stress* físico de materiais. Também é muito utilizada para modelar os tempos para reparo, MTTR, (*Mean Time to Repair*) de equipes de manutenção. Os principais parâmetros desta distribuição são os parâmetros de média  $\mu'$  e desvio padrão  $\sigma_T$ .

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - \mu'}{\sigma_T} \right)^2} \quad (4.15)$$

Neste trabalho a distribuição lognormal será utilizada exclusivamente para obter os modelos de distribuição das equipes de reparo (manutenção).

### 4.6.4 Distribuição Weibull

A função de distribuição Weibull é uma das mais utilizadas em engenharia da confiabilidade, a explicação deve-se à versatilidade desta distribuição em relação às outras. Esta distribuição foi proposta pelo engenheiro e físico sueco Waloddi Weibull em 1937 para modelar problemas relacionados com fadiga de metais.

Existem três tipos de distribuição Weibull, denominadas de Weibull 3-parâmetros, 2-parâmetros e 1-parâmetro. As funções (4.16) e (4.17) mostram as pdf's para as Weibull com 3 e 2 parâmetros respectivamente. Conforme citado anteriormente, a grande versatilidade da utilização da função Weibull reside nos parâmetros desta distribuição, dados em (4.18). Conforme os valores assumidos por estes parâmetros, é possível aproximar a distribuição Weibull com as distribuições exponencial, normal e lognormal.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (4.16)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (4.17)$$

$\beta$  = parâmetro de forma ou inclinação

$\gamma$  = parâmetro de situação ou vida mínima (4.18)

$\eta$  = parâmetro de escala ou vida característica

As funções cdf e confiabilidade, derivadas de 4.16, são dadas por (4.19) e (4.20) respectivamente.

$$F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (4.19)$$

$$R(t) = e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (4.20)$$

Sendo a função taxa de falha dada por (4.21).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (4.21)$$

Os parâmetros da função Weibull podem trazer informações sobre determinadas condições de um equipamento obtidas pela correlação com os dados de vida deste mesmo equipamento. Uma figura muito conhecida é a curva da banheira (4.3), nesta figura os diversos valores assumidos pelo parâmetro  $\beta$  são correlacionados com as diversas fases de vida de um equipamento (morte infantil, vida útil e fim de vida).

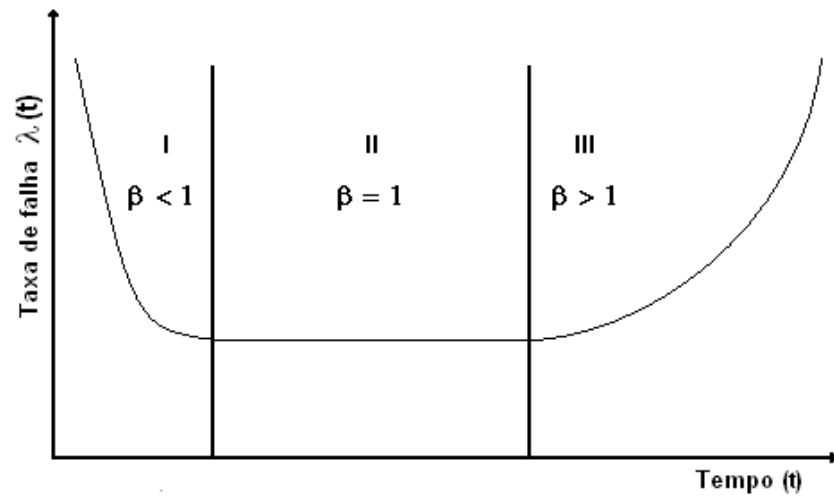


Figura 4.3 - Densidade de probabilidade contínua.

## 5.0 DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE

O capítulo 4 apresentou as principais funções matemáticas utilizadas para a análise da confiabilidade de um equipamento ou componente em função dos tempos de falha. Neste capítulo serão abordados os conceitos relativos à confiabilidade em sistemas através do conceito de Diagrama de Blocos de Confiabilidade, RBD, (*Reliability Block Diagram*).

### 5.1 Configuração dos Sistemas

Um bloco de confiabilidade (figura 5.1) é uma simbologia gráfica que contém informações sobre determinados parâmetros de confiabilidade que o bloco representa. Os blocos de confiabilidade são classificados como blocos estáticos, i.e, a confiabilidade é fixa e não varia no tempo, ou dinâmicos, onde a confiabilidade é função do tempo [14].

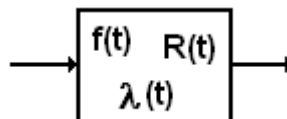


Figura 5.1 – Exemplo de um bloco de confiabilidade.

Inicialmente é necessário conhecer os diversos arranjos possíveis dos blocos de confiabilidade utilizados para representar equipamentos ou sistemas complexos. Os possíveis arranjos são:

- Configuração Série;
- Configuração Paralela;
- Configurações combinadas Série e Paralelo;
- Configurações k de n;
- Configurações Complexas.



## 5.2 Sistema Série

Os sistemas de blocos de confiabilidade arranjados em série representam os sistemas onde a indisponibilidade ou falha de um bloco ocasiona a indisponibilidade ou falha de todo o sistema série. Uma analogia com este sistema é o exemplo de uma corrente que sofre uma ruptura em um dos seus elos. A figura 5.2 ilustra um exemplo de um sistema de blocos em série.

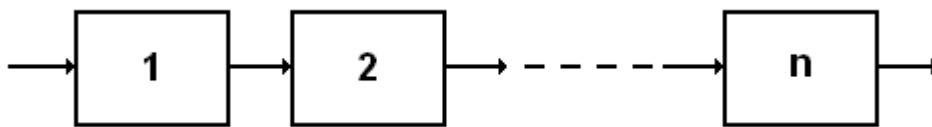


Figura 5.2 – Exemplo de um sistema série.

A probabilidade de ocorrência de uma série de eventos individuais,  $R_S$ , pode ser calculada através do produto das probabilidades de ocorrência de cada um dos eventos (5.1 e 5.2).

$$R_S = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdots P(X_n) \quad (5.1)$$

$$R_S = \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad (5.2)$$

Analogamente, a confiabilidade de  $n$  blocos dispostos em série (5.3) pode ser calculada da mesma forma que (5.2).

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (5.3)$$

Observa-se que a confiabilidade resultante  $R_S$  de  $n$  blocos dispostos em série (figura 5.3), com cada bloco possuindo uma confiabilidade de 80%, é menor que a menor das probabilidades de todos os blocos. Arranjos de blocos em série diminuem significativamente a confiabilidade de todo o sistema.



Figura 5.3 – Avaliação da confiabilidade para blocos em série.

### 5.3 Sistema Paralelo

O arranjo de blocos de confiabilidade em paralelo representa os sistemas onde a indisponibilidade ou falha de um bloco não ocasiona necessariamente a indisponibilidade ou falha de todo o sistema. A figura 5.4 ilustra um diagrama de blocos em paralelo.

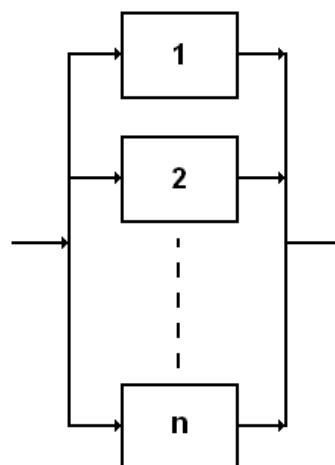


Figura 5.4 – Exemplo de um sistema em paralelo.

Intuitivamente os blocos em paralelo possibilitam uma idéia de redundância para o sistema. O cálculo da probabilidade para um sistema em paralelo é obtido da

mesma forma que o sistema série. As expressões 5.4 a 5.6 apresentam a formulação do cálculo.

$$Q_s = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdots P(X_n) \quad (5.4)$$

$$Q_s = \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad (5.5)$$

$$Q_s = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (5.6)$$

Porém o cálculo da confiabilidade resultante  $R_s$  em paralelo difere do sistema série, sendo determinado através de 5.7.

$$\begin{aligned} R_s &= 1 - Q_s = 1 - (Q_1 \cdot Q_2 \cdots Q_n) \\ R_s &= 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdots (1 - R_n)] \\ R_s &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Uma característica do sistema paralelo reside no fato da confiabilidade resultante  $R_s$  ser maior que o maior valor da confiabilidade de qualquer um dos blocos em paralelo. Para o exemplo de blocos possuindo 80% de confiabilidade, a valor de  $R_s$  aumenta conforme o número de blocos em paralelo cresce (figura 5.5).

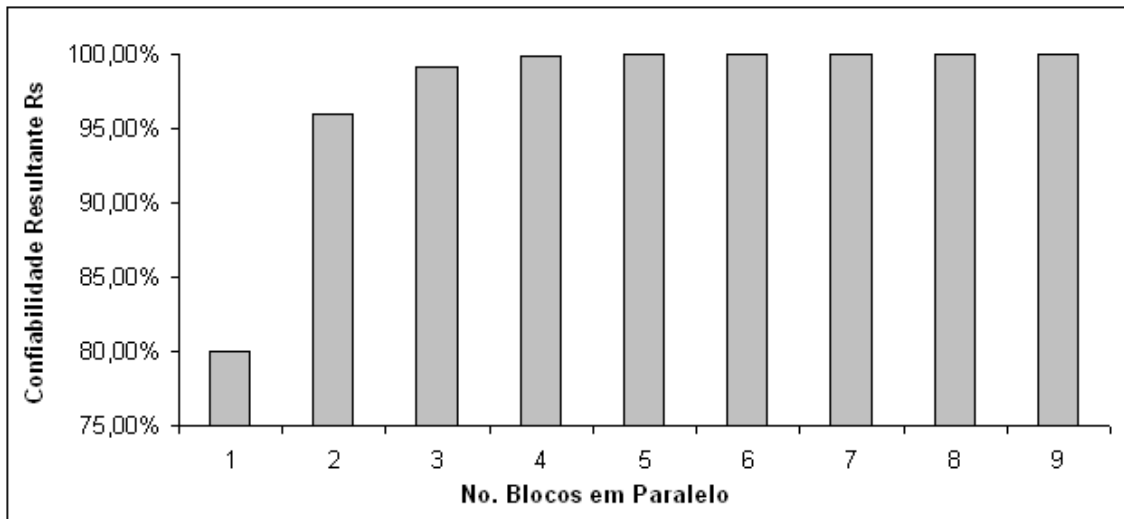


Figura 5.5 – Avaliação da confiabilidade para blocos em paralelo.

#### 5.4 Sistema k de n

A configuração de blocos de confiabilidade num sistema k de n é uma configuração particular da configuração em paralelo, no sistema k de n a falha ou a indisponibilidade do sistema ocorre quando k+1 blocos em um sistema de n blocos falham. A confiabilidade para o sistema k de n é calculada conforme a expressão em 5.8.

$$R_s(k, n, R) = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} R^r (1-R)^{n-r} \quad (5.8)$$

Um exemplo de aplicação para o sistema k de n pode ser ilustrado pelo barramento de alimentação contendo 4 geradores onde são necessários pelo menos 2 destes em operação para alimentar determinadas cargas (figura 5.6), o diagrama para este problema é dado pela figura 5.7.

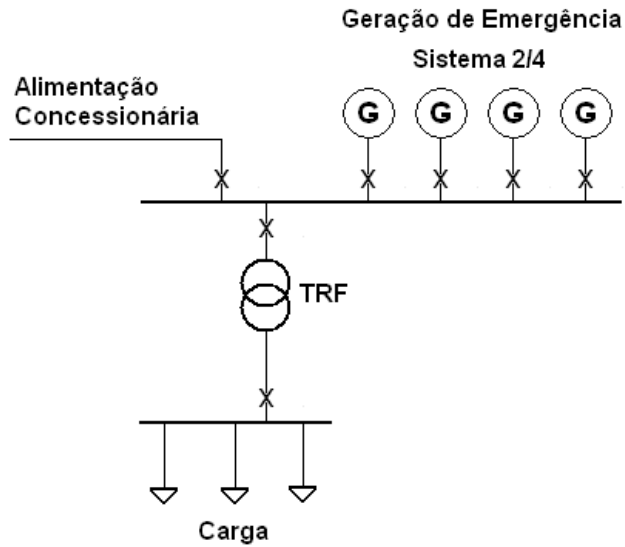


Figura 5.6 – Exemplo de um sistema k de n para um grupo de geradores.

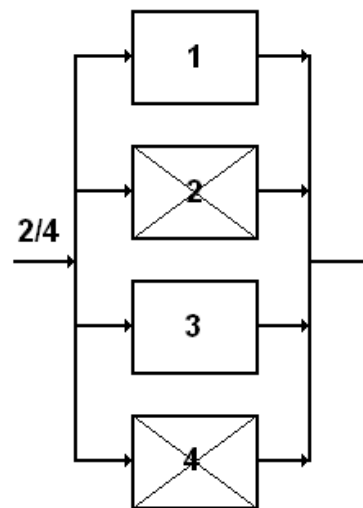


Figura 5.7 – RBD para o exemplo da figura 5.6.

Utilizando a expressão em 5.8, o cálculo da confiabilidade do sistema para o exemplo anterior é calculado conforme 5.9.

$$\begin{aligned}
 R_s(k, n, R) &= \binom{4}{2} 0,80^2 (1 - 0,80)^2 + \binom{4}{3} 0,80^3 (1 - 0,80)^1 + \binom{4}{4} 0,80^4 (1 - 0,80)^0 \\
 R_s(k, n, R) &= 6 \cdot 0,0256 + 4 \cdot 0,1024 + 1 \cdot 0,4096 \\
 R_s(k, n, R) &= 0,9728 = 97,28\%
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

## 5.5 Sistema Misto

O sistema misto ou complexo é aquele onde o RBD é composto de sistemas série, paralelo, k de n e demais configurações, todas elas agrupadas em um único diagrama. Um exemplo pode ser mostrado conforme a figura 5.8.

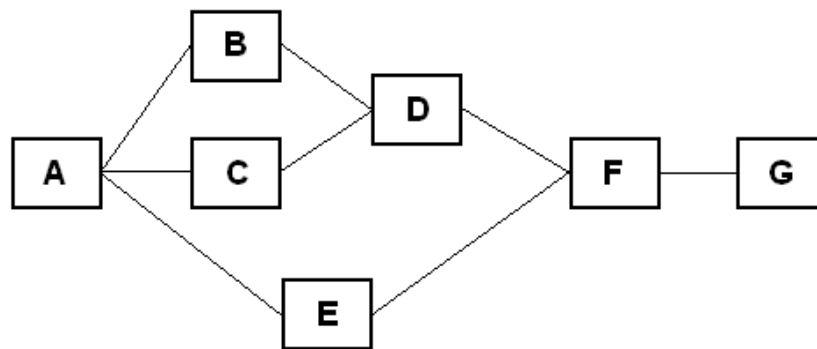


Figura 5.8 – Exemplo de um RBD para um sistema misto.

A determinação da confiabilidade resultante  $R_S$  do sistema misto ou complexo pode ser obtido através de alguns métodos, tais como:

- Método de decomposição;
- Método do espaço de eventos;
- Método dos caminhos.

Estes métodos apesar de não serem complexos na formulação matemática são extremamente trabalhosos à medida que o RBD cresce em complexidade, e na maioria das vezes são resolvidos por meio de algoritmos implementados em programas de computador.

## 5.6 Redundâncias

Redundâncias de equipamentos são comuns em um sistema elétrico, geralmente são utilizadas para prover maior confiabilidade no fornecimento de energia em um

dado setor do sistema. Na teoria da Confiabilidade existem diversas maneiras de estabelecer redundâncias, dois tipos serão abordados neste trabalho:

- Sistemas em *Load Sharing* (Carregamento compartilhado);
- Sistemas em *Standby*.

Os sistemas *Standby* são classificados de três maneiras:

- *Cold Standby*;
- *Warm Standby*;
- *Hot Standby*.

### 5.6.1 Sistemas em *Load Sharing*

Sistemas com redundância *Load Sharing* são aqueles onde existe um carregamento compartilhado entre os blocos. No caso de falha de um ou mais blocos deste sistema os outros assumem a carga deste, alterando a confiabilidade dos blocos remanescentes. A figura 5.9 ilustra um sistema de dois blocos em *Load Sharing*.

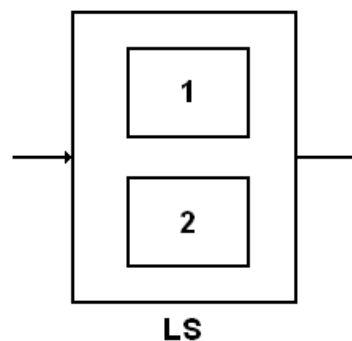


Figura 5.9 – Exemplo de redundância *Load Sharing* entre os blocos A e B.

Um bom exemplo para descrever a utilização de um sistema *Load Sharing* é o agrupamento de cabos elétricos em uma mesma fase. Se uma fase possui dois cabos, quando um deles sofre uma falha (falha de isolamento) o outro cabo assume

a parcela adicional de corrente do cabo que se rompeu. Geralmente neste caso um acréscimo de 50% da corrente.

As equações necessárias para modelar um sistema *Load Sharing* estão descritas em (5.10) a (5.14). Inicialmente é necessário descrever um modelo de *estressamento* que avalie a redução de um determinado parâmetro de vida do bloco para um determinado nível de *stress*. Um modelo muito utilizado é a relação da Lei da Potência Inversa, IPL, (*Inverse Power Law*), dada pela equação 5.10.

$$L(V) = \frac{1}{K \cdot V^n} \quad (5.10)$$

Nesta equação o valor de L, que é função do nível de stress V no qual o bloco é submetido, representa um parâmetro de vida típico de um equipamento, como por exemplo: a vida média (MTTF), vida B(X%) ou vida característica  $\eta$ . Os parâmetros K e n são parâmetros a serem determinados através da solução de um sistema de equação 2 x 2.

No sistema *Load Sharing* utiliza-se uma pdf que combina a distribuição de vida com a relação de *stress*, um exemplo pode ser a pdf denominada IPL-Weibull, dada por (5.11). A função confiabilidade desta função para o bloco 1 é dado por (5.12).

$$f_1(t, S_1) = \beta \cdot K \cdot S_1^n \cdot (K \cdot S_1^n \cdot t)^{\beta-1} e^{-(KS_1^n t)^\beta} \quad (5.11)$$

$$R_1(t, S_1) = e^{-(KS_1^n t)^\beta} \quad (5.12)$$

Na equação (5.13) o valor de S representa a carga total compartilhada pelos blocos em *Load Sharing*, P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> os percentuais compartilhados pelos blocos 1 e 2, e S<sub>1</sub> e S<sub>2</sub> o valor da carga compartilhada entre eles.



$$\begin{aligned} S_1 &= P_1 S \\ S_2 &= P_2 S \end{aligned} \quad (5.13)$$

A confiabilidade resultante para o sistema *Load Sharing* é determinada por (5.14).

$$\begin{aligned} R(t, S) &= R_1(t, S_1) \cdot R_2(t, S_2) + \\ &+ \int_0^t f_1(x, S_1) \cdot R_2(x, S_2) \cdot \left( \frac{R_2(t_{1e} + (t-x), S)}{R_2(t_{1e}, S)} \right) dx + \\ &+ \int_0^t f_2(x, S_2) \cdot R_1(x, S_1) \cdot \left( \frac{R_1(t_{2e} + (t-x), S)}{R_1(t_{2e}, S)} \right) dx \end{aligned} \quad (5.14)$$

### 5.6.2 Sistemas em *Standby*

Outra forma de redundância é denominada de *Standby*, nesta configuração a falha de um dos blocos, diferentemente da redundância *Load Sharing*, não afeta a distribuição de falhas dos outros blocos. Dois estados são possíveis em um sistema em *Standby*: estado ativo e estado *Standby*. Em ambos os estados as distribuições de falhas diferem. Denomina-se estado quiescente quando o bloco apresenta uma distribuição de falha em *Standby* e estado ativo quando o bloco apresenta uma distribuição de falha quando em operação (ativo).

A figura 5.10 ilustra um RBD com dois blocos numa configuração em *Standby*, sendo o bloco 1 ativo e o bloco 2 em *Standby*. Conforme visto anteriormente três classificações para as configurações em *Standby* são possíveis, estas classificações diferem entre si em relação à distribuição de falha no estado quiescente (falha associada ao bloco em *Standby*).

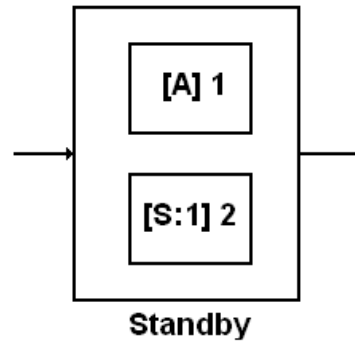


Figura 5.10 – Exemplo de redundância *Standby* entre os blocos 1 e 2.

Para a classificação *Cold Standby* a distribuição de falha do estado quiescente é nula. Para o sistema em *Hot Standby*, a distribuição de falha é igual aos estados quiescente e ativo, neste caso o sistema iguala-se à configuração em paralelo (figura 5.4). Para o caso intermediário onde a distribuição de falha do estado quiescente é menor que a distribuição de falha no estado ativo a configuração é denominada de *Warm Standby*.

A expressão (5.15) fornece o cálculo para a confiabilidade de dois blocos em um sistema *Standby*.

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(x) \cdot R_{2;SB}(x) \cdot \left( \frac{R_{2;A}(t_e + (t-x))}{R_{2;A}(t_e)} \right) dx \quad (5.15)$$

Sendo:

- $R_1$  e  $f_1$ : confiabilidade e a pdf para o bloco 1 ativo;
- $R_{2;SB}$ : confiabilidade para o bloco 2 em *Standby*;
- $R_{2;A}$ : confiabilidade para o bloco 2 ativo;
- $t_e$ : tempo equivalente do bloco em *Standby* quando o mesmo opera em modo ativo, conforme (5.16).

$$R_{2;SB}(x) = R_{2;A}(t_e) \quad (5.16)$$

A expressão (5.15) pode ser modificada de forma a incluir o tempo para chaveamento entre os blocos ativo e *Standby* (figura 5.11). Maiores detalhes sobre esta formulação matemática pode ser encontrada na referência [14, pg. 151]. Uma aplicação típica deste chaveamento entre blocos ativo e *Standby* reside no estudo de confiabilidade de um sistema elétrico em função do tempo de entrada de um gerador após a ocorrência de uma interrupção de energia da concessionária. Em geral este tempo irá influenciar na disponibilidade e confiabilidade do sistema.

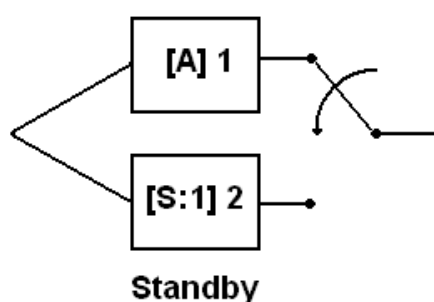


Figura 5.11 – Exemplo de redundância *Standby* com chaveamento entre os blocos 1 e 2.

## 5.7 Diferenças entre Arranjos de Blocos de Confiabilidade e Topologia de Equipamentos de um Sistema Elétrico

Os diagramas de blocos de confiabilidade retratam propriedades de estados de falha ou sucesso de um sistema composto de componentes ou equipamentos. O arranjo físico destes componentes ou equipamentos nem sempre é igual à configuração dos blocos de um RBD. Quando um sistema elétrico é transposto para um RBD é importante observar que, topologicamente, podem ocorrer diferenças dos arranjos entre o sistema físico (sistema elétrico) e o RBD.

Um exemplo pode ser demonstrado conforme a figura 5.12, as três impedâncias em paralelo possuem uma função no circuito de resultar uma impedância menor que  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ , conforme (5.17). Caso ocorra uma falha (abertura do circuito) de uma destas impedâncias, a impedância equivalente  $Z_{eq}$  torna-se maior, resultando numa falha para o circuito elétrico. Desta forma, as três impedâncias, apesar de

topologicamente serem paralelas no circuito, devem ser configuradas em série no RBD (figura 5.13).

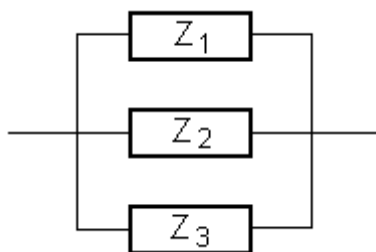


Figura 5.12 – Impedâncias retratadas em um circuito elétrico.

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \quad (5.17)$$

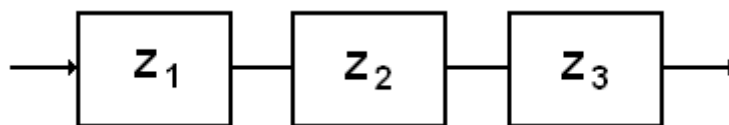


Figura 5.13 – Impedâncias retratadas em um RBD.

## 6.0 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ENERGIA DA VMZ-TM

### 6.1 A Empresa

A Votorantim Metais (VM) é uma *holding* do grupo Votorantim com 8 unidades produtivas no Brasil e seis no exterior (Peru, Colômbia, Estados Unidos e China), dirige seu foco para a mineração e metalurgia de zinco (9 unidades), níquel (3 unidades) e aços longos (2 unidades).

A unidade de Três Marias (VMZ-TM) compõem uma das 9 unidades da Votorantim Metais Zinco S.A (VMZ), possui capacidade produtiva anual de 180 mil toneladas de zinco e juntamente com mais 8 unidades de mineração e metalurgia de zinco ocupam a posição de terceira maior produtora mundial de zinco.

A produção da unidade VMZ-TM é direcionada para fabricação de zinco SHG - *Super High Grade* (mínimo de 99,995% de pureza), ligas de zinco e óxido de zinco. O óxido de zinco, devido à suas excelentes propriedades térmicas, eletrônicas, químicas e óticas, possui diversas aplicações industriais, tais como: vulcanização de borrachas, cosméticos, fosfatados de zinco, medicamentos, vidrados cerâmicos, polímeros, produtos agrícolas e ração animal.

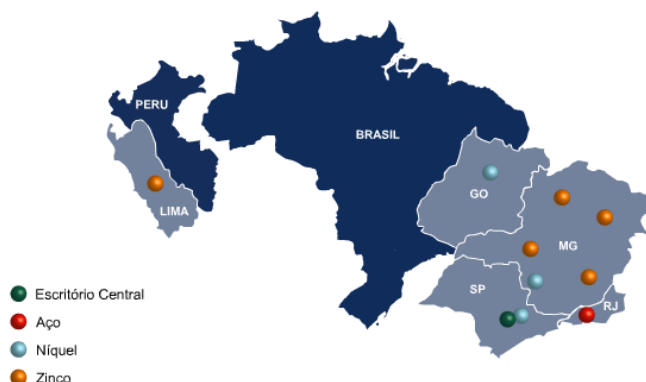


Figura 6.1 – Mapa das unidades da Votorantim Metais na América do Sul.

## 6.2 O Sistema Elétrico da VMZ-TM

O sistema elétrico da VMZ-TM é composto basicamente de uma linha de transmissão em 138 kV (com capacidade nominal de 110MW e 12 torres interligando a Usina Hidrelétrica de Três Marias, UHE-TM, e a planta da VMZ-TM), uma subestação principal de 13.8 kV que representa o principal centro de distribuição de energia elétrica para a planta (com carga total instalada de 105MW e capacidade para até 120MW) e 36 subestações elétricas em 13,8 kV.

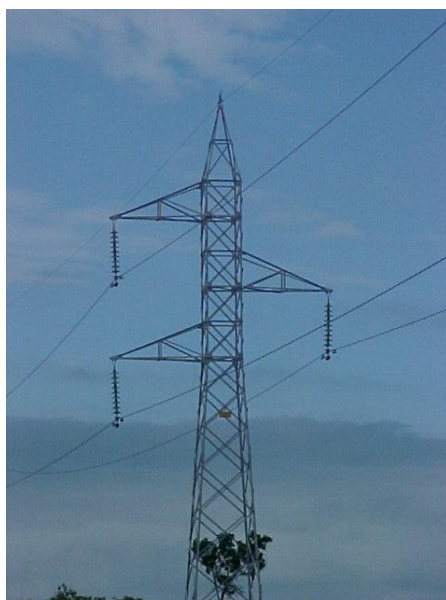


Figura 6.2 – Linha de transmissão 138 kV.

A operação do sistema possui modulação de demanda com 104 MW de energia no HFP (horário fora de ponta) e 92 MW no HP (horário de ponta). O sistema possui ainda proteção contra descargas atmosféricas, sistema de aterramento, dispositivos de proteção através de relés digitais e sistema de controle e gerenciamento de energia. As figuras 6.2 a 6.4 ilustram os principais equipamentos do sistema elétrico da VMZ-TM.



Figura 6.3 – Cubículos de distribuição em 13,8 kV.

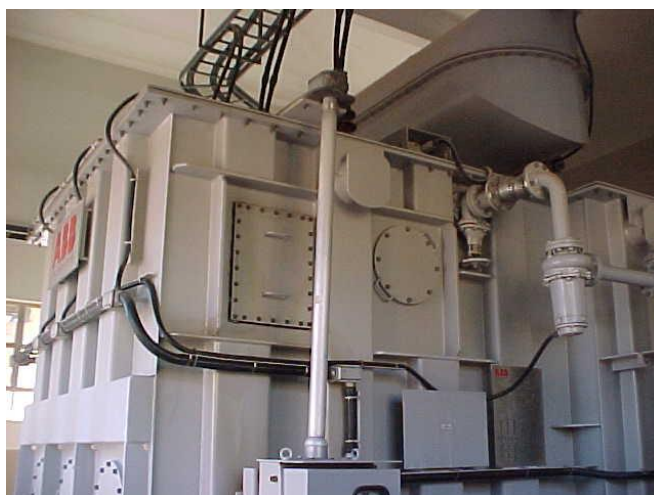


Figura 6.4 – Transformador retificador de 40 MVA.

O estudo de confiabilidade deste trabalho é focado na sala de eletrólise D que é a principal carga do sistema elétrico da VMZ-TM. Esta sala possui uma carga instalada de 80 MVA sendo composta de duas filas de 40 células cada, sendo que cada célula tem 114 placas de catodos e 115 placas de anodo, a sala D produz 350 toneladas de zinco por dia, sendo responsável por 70% da produção total da unidade de Três Marias e 49% de todo o zinco produzido no país. O diagrama unifilar da figura 6.5 representa a simplificação do sistema para o estudo de confiabilidade para a carga da sala D.

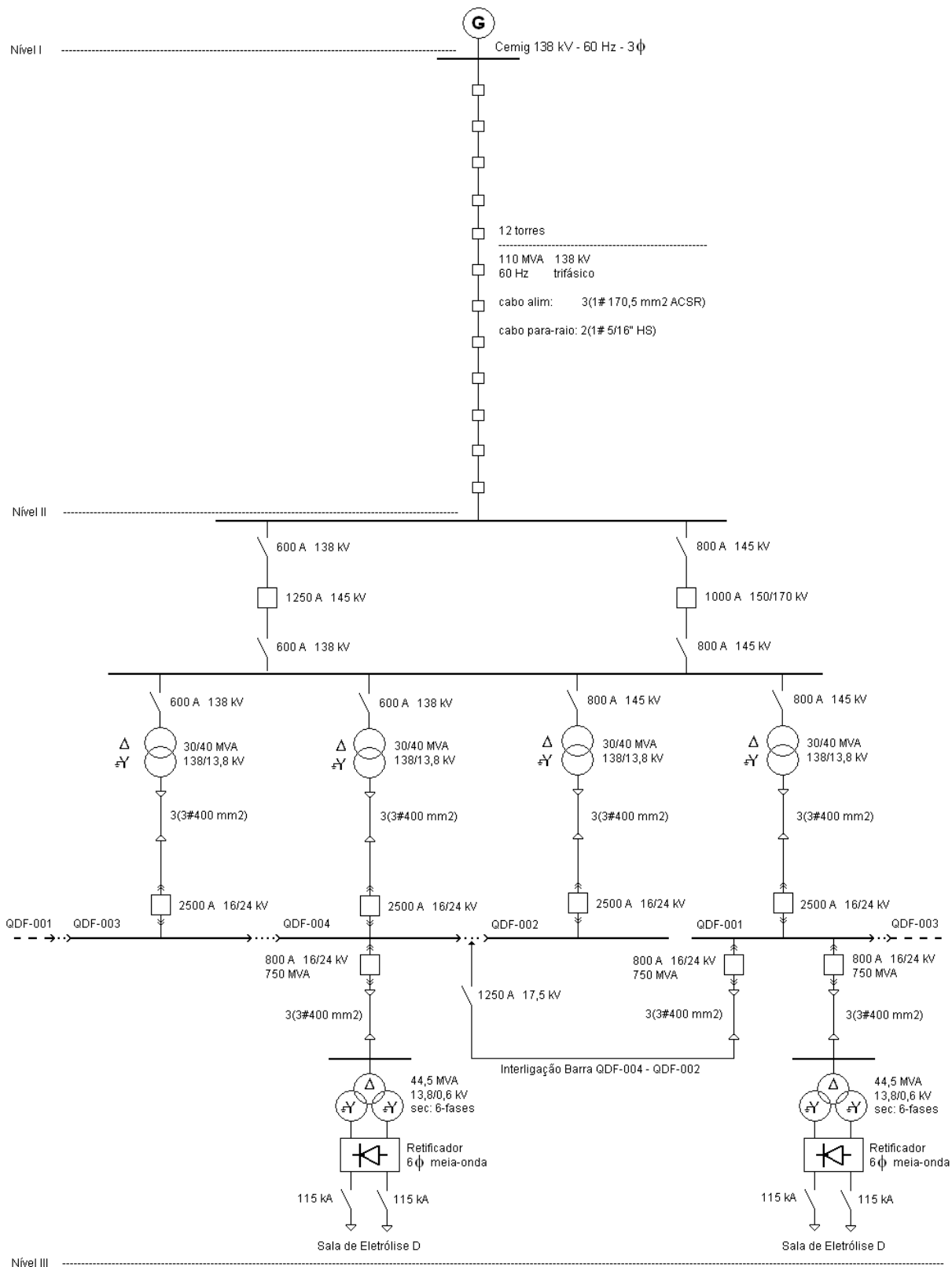


Figura 6.5 – Diagrama unifilar da VMZ-TM contemplando as linhas de transmissões, Pátio 138 kV e Sala de Eletrólise D.



### 6.3 Análise das Distribuições do Sistema Elétrico VMZ-TM

As análises de distribuição dos parâmetros de qualidade da energia do sistema elétrico da VMZ-TM foram realizadas entre o período de janeiro de 2005 a junho de 2008, os dados de ocorrência dos parâmetros de afundamentos de tensão e interrupções foram obtidos através de um banco de dados provenientes do sistema de gerenciamento de energia e de informações da própria concessionária.

As figuras 6.6 a 6.8 representam os gráficos de probabilidade para a não ocorrência dos eventos de interrupção de energia, estes gráficos são divididos respectivamente para as ocorrências de interrupções atribuídas à concessionária, VMZ-TM e interrupção geral, que é a soma dos eventos de interrupção causados pela concessionária e a planta VMZ-TM. Os dados foram analisados através do software *Weibull++* da *Reliasoft Corporation*. As interrupções analisadas tiveram como efeito a parada da sala de eletrólise D.

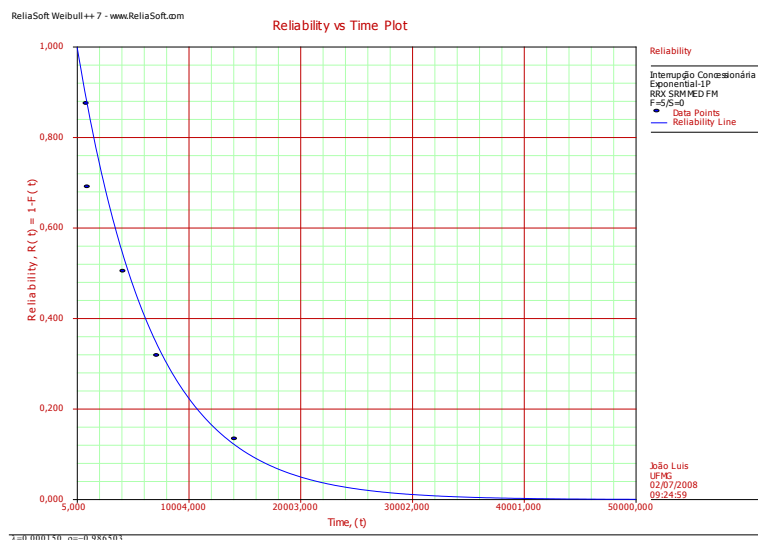


Figura 6.6 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de uma interrupção causada pela concessionária.

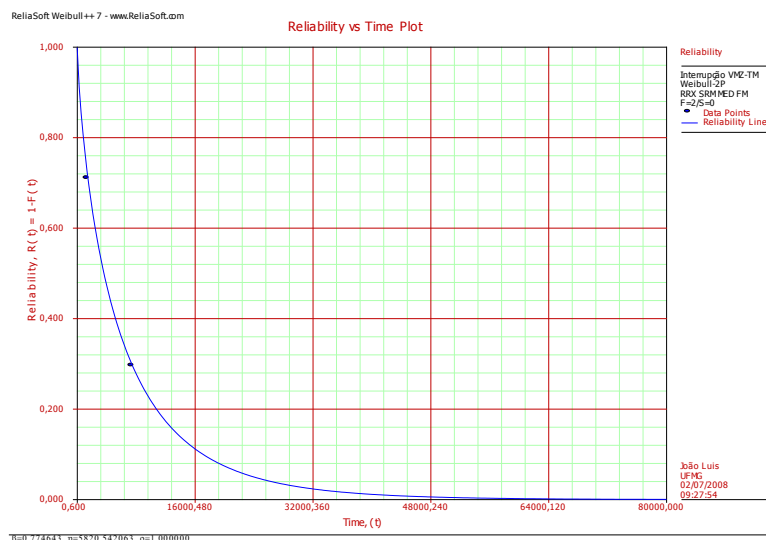


Figura 6.7 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de uma interrupção causada pela VMZ-TM.

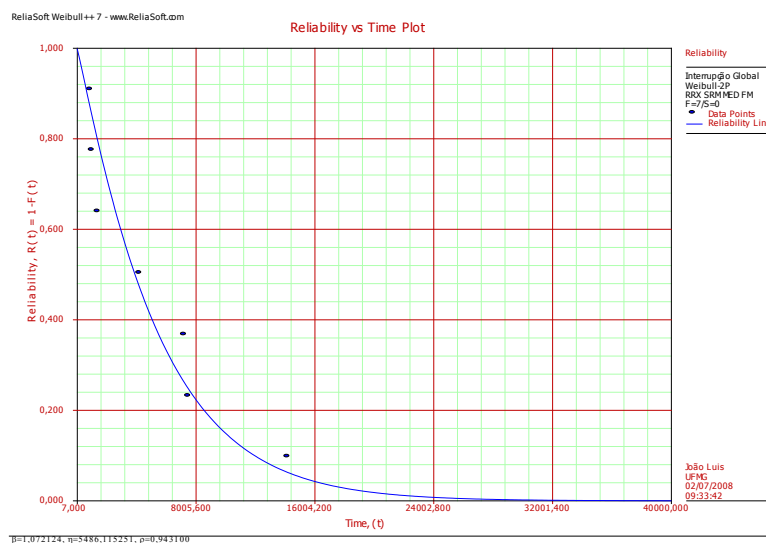


Figura 6.8 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de uma interrupção causada pela concessionária e VMZ-TM.

As análises para os afundamentos de tensão devido à concessionária e geral (concessionária e VMZ-TM) são apresentados respectivamente pelos gráficos das figuras 6.9 e 6.10, estas análises são análogas às análises feitas para os parâmetros de interrupção de energia. Nota-se que o parâmetro de afundamento de tensão devido à VMZ-TM não foi analisado individualmente devido ao fato do banco de dados conter somente um evento no período analisado, contudo esta informação foi adicionada na análise de afundamento geral (concessionária e VMZ-TM).

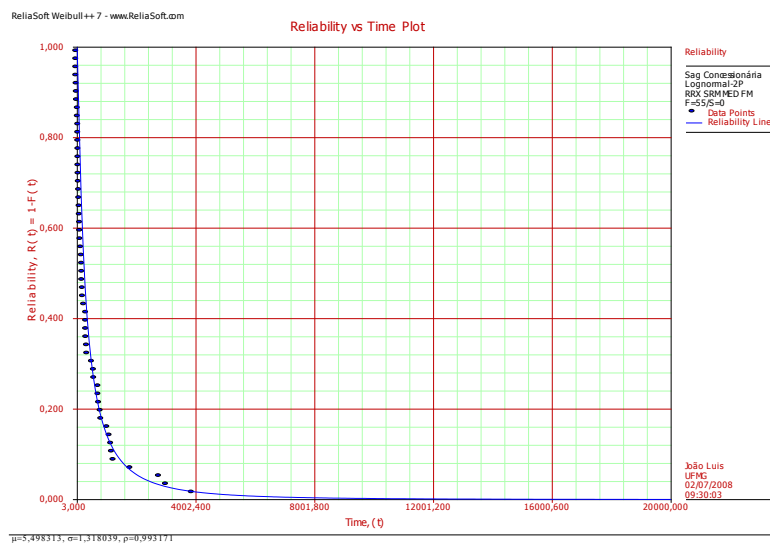


Figura 6.9 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de um afundamento de tensão causado pela concessionária.

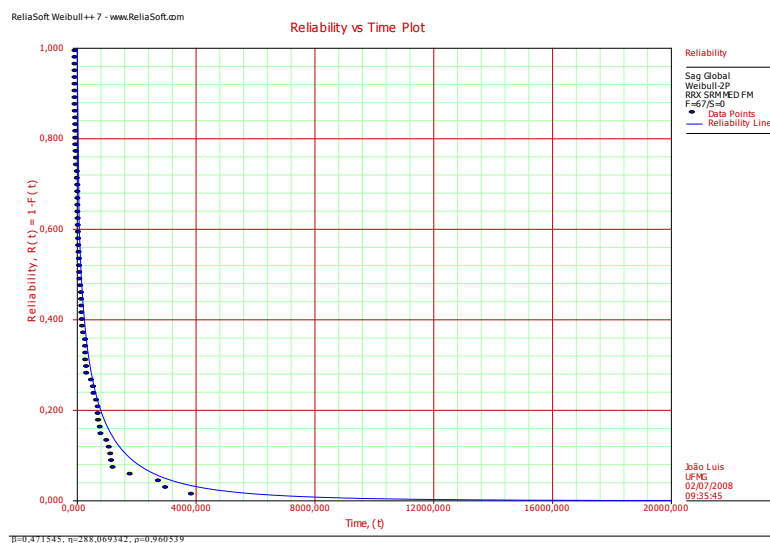


Figura 6.10 – Probabilidade para a não ocorrência (confiabilidade) de um afundamento de tensão causado pela concessionária e VMZ-TM.

A tabela 6.1 apresenta o resultado das análises para os parâmetros de afundamentos de tensão e interrupção causados pela concessionária e pela planta VMZ-TM, que causaram a parada da sala de eletrólise D durante o período avaliado. Nesta tabela contém também informações sobre os tipos e os parâmetros das funções de distribuição, o coeficiente de correlação dos dados com a distribuição e os valores do tempo médio (MTTF) para a ocorrência dos parâmetros de qualidade

da energia analisados, incluindo os valores dos intervalos de confiança menor e maior (MTTF<sub>down</sub> e MTTF<sub>up</sub>) com probabilidade igual de 95% para ambos os lados.

Através da análise dos coeficientes de correlação (tabela 6.1) foi possível verificar a boa aderência dos dados relativos aos eventos de qualidade da energia com os modelos de distribuições utilizados. Verificou-se, através da determinação do modelo de distribuição exponencial, a característica aleatória dos eventos de interrupção devido à concessionária, este fato é caracterizado pela natureza aleatória dos distúrbios atmosféricos que representa o principal modo de falha atribuído às interrupções nas linhas de transmissão do sistema Cemig. Os eventos de qualidade da energia originados pela planta da VMZ-TM são tipicamente atribuídos aos modos de falha característicos de *stress* térmico do sistema elétrico, este fato também foi evidenciado através da determinação dos modelos de distribuição Weibull.

Tabela 6.1 – Resumo das análises de distribuição da VMZ-TM.

Análise de Dados de Vida						
Parâmetro de Qualidade da Energia	Modelo de Distribuição	Parâmetro da Distribuição	Coeficiente de Correlação ( $\rho$ )	Tempo Médio para Ocorrência do Parâmetro 95% bilateral		
				MTTF <sub>down</sub>	MTTF	MTTF <sub>up</sub>
<b>Interrupção</b>						
Concessionária	Exponencial 1p	$\lambda = 150 \times 10^{-6}$	-0,986503	2.777,33	6.672,62	16.031,16
VMZ-TM	Weibull 2p	$\eta = 5820,54$ ; $\beta = 0,774643$	1,000000	439,15	6.754,13	103.878,40
Total (Concessionária + VMZ-TM)	Weibull 2p	$\eta = 5486,12$ ; $\beta = 1,072124$	0,943100	2.563,56	5.340,17	11.124,16
<b>Afundamento de Tensão</b>						
Concessionária	Lognormal	$\beta = 244,279485$ ; $\alpha = 1,318039$	0,993171	411,00	582,27	824,90
VMZ-TM	-	-	-	-	-	-
Total (Concessionária + VMZ-TM)	Weibull 2p	$\eta = 288,069342$ ; $\beta = 0,471545$	0,960539	368,42	645,84	1.132,15

## 6.4 Diagrama de Blocos de Confiabilidade do Sistema Elétrico VMZ-TM

O RBD do sistema elétrico da VMZ-TM foi construído com base nas informações da topologia do diagrama unifilar da figura 6.5. Conforme explanado anteriormente este RBD focou somente a carga crítica da sala de eletrólise D, demais cargas do sistema que não fazem parte do escopo deste trabalho foram omitidas do desenho. O RBD assim como o diagrama unifilar é composto dos níveis de confiabilidade I, II e III, representados pelo sistema de geração da concessionária, linhas de transmissão e sistema de distribuição da VMZ-TM. Os diagramas de blocos relativos aos níveis de confiabilidade I, II e III do diagrama unifilar são mostrados respectivamente pelos gráficos das figuras 6.11, 6.12 e 6.13.

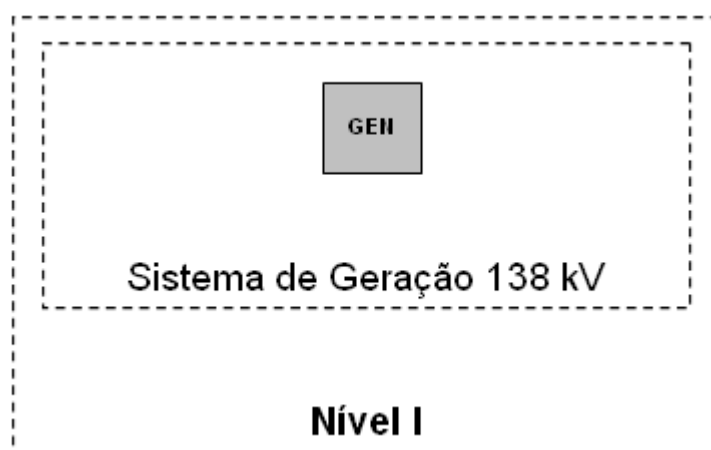


Figura 6.11 – Diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema de geração (Nível I).

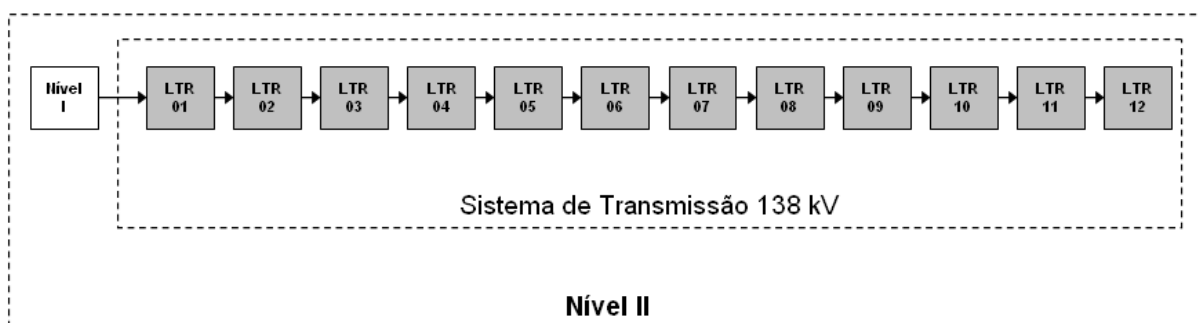


Figura 6.12 – Diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema de transmissão e Nível II.

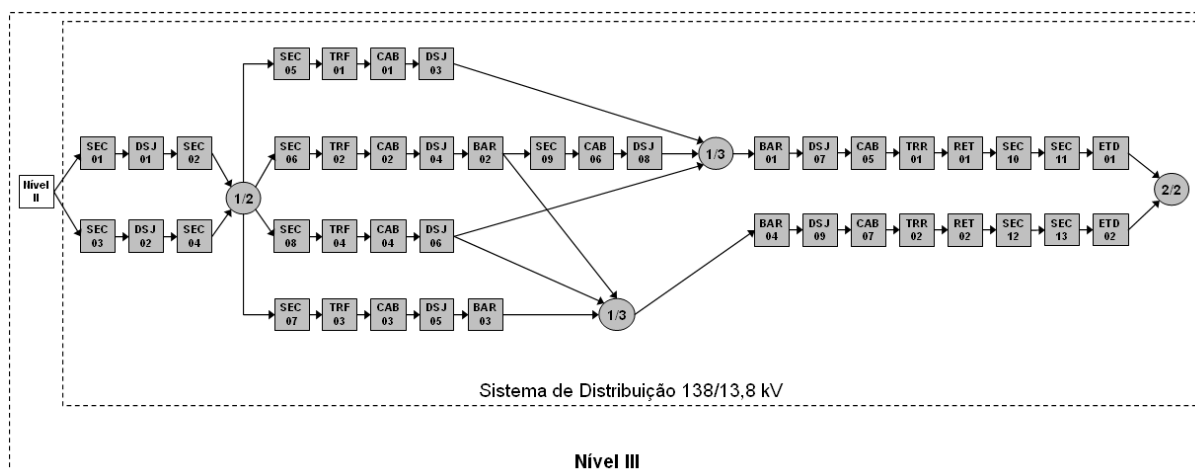


Figura 6.13 – Diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema de distribuição e Nível III.

## 6.5 Simulação Monte Carlo

O método de simulação Monte Carlo foi desenvolvido em 1946 por Stanislaw Ulam (1909-1986), um matemático Polonês que trabalhou nos Estados Unidos para John Von Neumann no Projeto Manhattan durante a Segunda Guerra Mundial. Este método envolve o uso de experimentos repetitivos para apresentar respostas a problemas complexos. Neste trabalho os diagramas de blocos de confiabilidade do sistema elétrico da VMZ-TM são simulados por este método através da utilização do software *Blocksim* da *Reliasoft Corporation*.

As análises de distribuições de dados de vida dos parâmetros de qualidade da energia do sistema elétrico da VMZ-TM, abordado no item 6.3, são utilizadas na simulação dos diagramas de blocos de confiabilidade, elaborados no item 6.4, juntamente com referências internacionais de dados de falha de equipamentos e tempos de reparo corretivos.

Determinados equipamentos do sistema elétrico da VMZ-TM não possuíam dados de falha no período analisado entre janeiro de 2005 a junho de 2008 ou nunca tiveram registro de falha. Para estes casos recorreu-se à pesquisa sobre dados de falha através de referências internacionais.

Tabela 6.2 – Taxa de falhas provenientes de normas internacionais utilizadas para os equipamentos elétricos da VMZ-TM. FONTE: (IEEE, 2007), (IEEE, 1984) e NPRD 95.

Sistema/Equipamento Elétrico	Código	Taxa de Falha (/10 <sup>6</sup> horas)			Média Geométrica
		IEEE Std 493 - 2007	IEEE Std 500 - 1984	NPRD 95	
Barramento 13,8 kV	BAR01 a BAR04	0,856	-	1,876	<b>1,267</b>
Cabo isolado 400 mm <sup>2</sup>	CAB01 a CAB07	5,385	-	2,710	<b>3,820</b>
Chaves seccionadoras 138 kV	SEC01 a SEC08	2,048	2,770	3,473	<b>2,701</b>
Chaves seccionadoras 13,8 kV	SEC09	2,048	2,770	3,473	<b>2,701</b>
Chaves seccionadoras 115 kA	SEC10 a SEC13	2,048	2,770	3,473	<b>2,701</b>
Disjuntores 138 kV	DSJ01 e DSJ02	4,539	6,620	2,159	<b>4,018</b>
Disjuntores a vácuo 13,8 kV	DSJ03 a DSJ09	4,539	2,400	2,654	<b>3,069</b>
Retificador hexafásico meia onda	RET01 e RET02	0,510	-	0,260	<b>0,364</b>
Sistema de torre e cabos de transmissão em 138 kV	LTR01 a LTR12	-	-	-	-
Transformador trifásico 138/13,8 kV 40 MVA	TRF01 a TRF04	2,001	2,060	-	<b>2,030</b>
Transformador retificador 13,8 kV 40MVA	TRR01 e TRR02	1,747	-	-	<b>1,747</b>

A tabela 6.2 apresenta taxa de falhas para equipamentos elétricos extraídos das normas IEEE Std. 413, IEEE Std. 500 e NPRD 95. O valor utilizado é a média geométrica das taxas de falha provenientes das três referências consultadas. Estas referências também fornecem dados sobre tempos de reparo conforme a tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Tempo médio para reparo proveniente de normas internacionais utilizadas para os equipamentos elétricos da VMZ-TM. FONTE: (IEEE, 2007), (IEEE, 1984) e NPRD 95.

Sistema/Equipamento Elétrico	Código	Tempo Médio para Reparo MTTR (horas)		
		IEEE Std 493 - 2007	IEEE Std 500 - 1984	NPRD 95
Barramento 13,8 kV	BAR01 a BAR04	4,00	-	-
Cabo isolado 400 mm <sup>2</sup>	CAB01 a CAB07	1,82	-	-
Chaves seccionadoras 138 kV	SEC01 a SEC08	2,27	2,12	-
Chaves seccionadoras 13,8 kV	SEC09	2,27	2,12	-
Chaves seccionadoras 115 kA	SEC10 a SEC13	2,27	2,12	-
Disjuntores 138 kV	DSJ01 e DSJ02	9,39	12,00	-
Disjuntores a vácuo 13,8 kV	DSJ03 a DSJ09	9,39	5,00	-
Retificador hexafásico meia onda	RET01 e RET02	16,00	-	-
Sistema de torre e cabos de transmissão em 138 kV	LTR01 a LTR12	-	-	-
Transformador trifásico 138/13,8 kV 40 MVA	TRF01 a TRF04	6,09	-	-
Transformador retificador 13,8 kV 40MVA	TRR01 e TRR02	6,09	-	-

As distribuições e os parâmetros de falha de todos os equipamentos elétricos do sistema VMZ-TM utilizados na simulação dos blocos de confiabilidade são dados pela tabela 6.4. As tabelas 6.5 e 6.6 fornecem os tempos utilizados na simulação para reparos corretivos destas falhas. A tabela 6.5 apresenta a função lognormal com os parâmetros de média e desvio padrão para os tempos de reparo corretivo. A forma simplificada é dada pela tabela 6.6 onde os parâmetros desta função são os valores de beta e alfa. O software *Blocksim* utiliza a forma simplificada para os parâmetros da função lognormal.

Tabela 6.4 – Taxa de falhas utilizadas para os equipamentos elétricos da VMZ-TM.

Sistema/Equipamento Elétrico	Código	Tempo para Falha TTF	
		Tipo de Distribuição	Parâmetros da Distribuição
Barramento 13,8 kV	BAR01 a BAR04	Exponencial	$\lambda = 1,267 \times 10^{-6}$
Cabo isolado 400 mm <sup>2</sup>	CAB01 a CAB07	Exponencial	$\lambda = 3,820 \times 10^{-6}$
Chaves seccionadoras 138 kV	SEC01 a SEC08	Exponencial	$\lambda = 2,701 \times 10^{-6}$
Chaves seccionadoras 13,8 kV	SEC09	Exponencial	$\lambda = 2,701 \times 10^{-6}$
Chaves seccionadoras 115 kA	SEC10 a SEC13	Exponencial	$\lambda = 2,701 \times 10^{-6}$
Disjuntores 138 kV	DSJ01 e DSJ02	Exponencial	$\lambda = 4,018 \times 10^{-6}$
Disjuntores a vácuo 13,8 kV	DSJ03 a DSJ09	Exponencial	$\lambda = 3,069 \times 10^{-6}$
Geração Cemig 138 kV	GEN	Exponencial	$\lambda = 150,000 \times 10^{-6}$
Retificador hexafásico meia onda	RET01 e RET02	Exponencial	$\lambda = 76,104 \times 10^{-6}$
Sistema de torre e cabos de transmissão em 138 kV	LTR01 a LTR12	Exponencial	$\lambda = 20,755 \times 10^{-6}$
Sala de Eletrólise D	ETD01 e ETD02	Exponencial	$\lambda = 38,051 \times 10^{-6}$
Transformador trifásico 138/13,8 kV 40 MVA	TRF01 a TRF04	Exponencial	$\lambda = 2,030 \times 10^{-6}$
Transformador retificador 13,8 kV 40MVA	TRR01 e TRR02	Exponencial	$\lambda = 1,747 \times 10^{-6}$



Tabela 6.5 – Tempo para reparo corretivo utilizando a função lognormal com os parâmetros de média e desvio padrão.

Sistema/Equipamento Elétrico	Código	Tempo para Reparo Corretivo TTR	
		Tipo de Distribuição	Parâmetros da Distribuição
Barramento 13,8 kV	BAR01 a BAR04	Lognormal	$\mu = 1,00$ ; $\sigma = 0,67$
Cabo isolado 400 mm <sup>2</sup>	CAB01 a CAB07	Lognormal	$\mu = 2,00$ ; $\sigma = 0,50$
Chaves seccionadoras 138 kV	SEC01 a SEC08	Lognormal	$\mu = 2,00$ ; $\sigma = 0,67$
Chaves seccionadoras 13,8 kV	SEC09	Lognormal	$\mu = 0,67$ ; $\sigma = 1,00$
Chaves seccionadoras 115 kA	SEC10 a SEC13	Lognormal	$\mu = 0,67$ ; $\sigma = 1,00$
Disjuntores 138 kV	DSJ01 e DSJ02	Lognormal	$\mu = 4,00$ ; $\sigma = 1,00$
Disjuntores a vácuo 13,8 kV	DSJ03 a DSJ09	Lognormal	$\mu = 1,00$ ; $\sigma = 0,33$
Geração Cemig 138 kV	GEN	Lognormal	$\mu = 3,00$ ; $\sigma = 0,50$
Retificador hexafásico meia onda	RET01 e RET02	Lognormal	$\mu = 1,50$ ; $\sigma = 0,50$
Sistema de torre e cabos de transmissão em 138 kV	LTR01 a LTR12	Lognormal	$\mu = 3,00$ ; $\sigma = 1,50$
Sala de Eletrólise D	ETD01 e ETD02	Lognormal	$\mu = 3,00$ ; $\sigma = 2,00$
Transformador trifásico 138/13,8 kV 40 MVA	TRF01 a TRF04	Lognormal	$\mu = 12,00$ ; $\sigma = 4,00$
Transformador retificador 13,8 kV 40MVA	TRR01 e TRR02	Lognormal	$\mu = 8,00$ ; $\sigma = 3,00$

Tabela 6.6 – Tempo para reparo corretivo utilizando a função lognormal simplificada com os parâmetros beta e alfa.

Sistema/Equipamento Elétrico	Código	Tempo para Reparo Corretivo TTR	
		Tipo de Distribuição	Parâmetros da Distribuição (forma reduzida)
Barramento 13,8 kV	BAR01 a BAR04	Lognormal	$\beta = 0,83$ ; $\alpha = 0,61$
Cabo isolado 400 mm <sup>2</sup>	CAB01 a CAB07	Lognormal	$\beta = 1,94$ ; $\alpha = 0,25$
Chaves seccionadoras 138 kV	SEC01 a SEC08	Lognormal	$\beta = 1,90$ ; $\alpha = 0,33$
Chaves seccionadoras 13,8 kV	SEC09	Lognormal	$\beta = 0,37$ ; $\alpha = 1,08$
Chaves seccionadoras 115 kA	SEC10 a SEC13	Lognormal	$\beta = 0,37$ ; $\alpha = 1,09$
Disjuntores 138 kV	DSJ01 e DSJ02	Lognormal	$\beta = 3,88$ ; $\alpha = 0,25$
Disjuntores a vácuo 13,8 kV	DSJ03 a DSJ09	Lognormal	$\beta = 0,95$ ; $\alpha = 0,32$
Geração Cemig 138 kV	GEN	Lognormal	$\beta = 2,96$ ; $\alpha = 0,17$
Retificador hexafásico meia onda	RET01 e RET02	Lognormal	$\beta = 1,42$ ; $\alpha = 0,32$
Sistema de torre e cabos de transmissão em 138 kV	LTR01 a LTR12	Lognormal	$\beta = 2,68$ ; $\alpha = 0,47$
Sala de Eletrólise D	ETD01 e ETD02	Lognormal	$\beta = 2,50$ ; $\alpha = 0,61$
Transformador trifásico 138/13,8 kV 40 MVA	TRF01 a TRF04	Lognormal	$\beta = 11,38$ ; $\alpha = 0,32$
Transformador retificador 13,8 kV 40MVA	TRR01 e TRR02	Lognormal	$\beta = 7,49$ ; $\alpha = 0,36$

## 6.6 Análise da Confiabilidade e Disponibilidade

A tabela 6.7 apresenta os resultados da simulação de todo o sistema elétrico da VMZ-TM. A simulação foi realizada para um período de 8760 horas, equivalente a 1 ano, que representa o tempo para atingir as metas de produção da empresa. Foram utilizadas 5000 simulações para cada diagrama de blocos, os diagramas simulados foram o sistema de geração, sistema de transmissão, sistema de distribuição, nível de confiabilidade I (geração), nível de confiabilidade II (geração e transmissão) e nível de confiabilidade III (geração, transmissão e distribuição).

Os resultados da simulação são as variáveis de disponibilidade média e instantânea para 8760 horas, confiabilidade, tempo médio para a primeira falha (interrupção), tempo total disponível e indisponível do sistema elétrico, número de falhas e custos devido a não disponibilidade. Através das análises dos resultados da simulação (tabela 6.7) pode-se afirmar que o sistema elétrico da VMZ-TM é bastante robusto devido principalmente aos valores de disponibilidade e número de falhas obtido pela simulação ao longo do ano.

Tabela 6.7 – Resultado da simulação do sistema elétrico da VMZ-TM.

Parâmetros da Simulação	Resultado da Simulação do Sistema Elétrico da VMZ-TM					
	Sistema de Geração 138 kV	Sistema de Transmissão 138 kV	Sistema de Distribuição 138/13,8 kV	Nível I	Nível II	Nível III
Disponibilidade Média	0,999545	0,999251	0,999478	0,999545	0,998796	0,998286
Desvio Padrão para a Disponibilidade Média	0,000389	0,000552	0,000439	0,000389	0,000678	0,000812
Disponibilidade para 8760 horas (1 ano)	0,9994	0,9992	0,9996	0,9994	0,9988	0,9980
Confiabilidade para 8760 h (1 ano)	0,251	0,105	0,100	0,251	0,029	0,003
MTTFF (Tempo Médio para a Primeira Falha)	6.423,56	3.952,40	3.823,24	6.423,56	2.395,90	1.490,08
Tempo Total Disponível	8.756,01	8.753,44	8.755,43	8.756,01	8.749,46	8.744,99
Tempo Total Indisponível	3,99	6,56	4,57	3,99	10,54	15,01
Número de Falhas	1,33	2,17	2,28	1,33	3,51	5,73
Desvio Padrão para o Número de Falhas	1,12	1,45	1,50	1,12	1,85	2,39
Custo Total das Falhas (R\$)	324,20	533,50	372,03	324,20	857,38	1.220,69
Lucro Cessante (R\$)	274.645,96	451.961,26	315.167,92	274.645,96	726.331,09	1.034.113,90

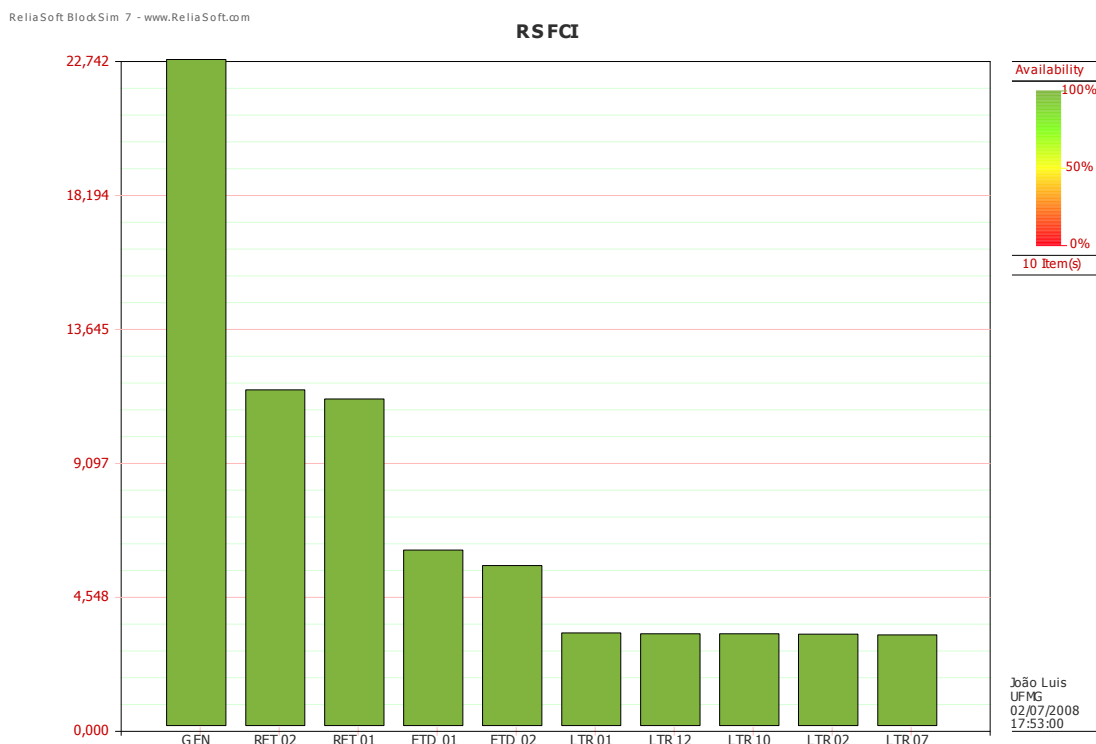


Figura 6.14 – Relação dos dez equipamentos que mais impactaram na disponibilidade do sistema elétrico da VMZ-TM.

A figura 6.14 ilustra um gráfico de barras que mostra o impacto percentual dos equipamentos elétricos para a indisponibilidade do sistema elétrico da VMZ-TM. Neste gráfico o sistema de geração da concessionária, retificadores, salas de eletrólise e linhas de transmissão são os maiores responsáveis pela indisponibilidade geral do sistema.

Ações para a melhoria da disponibilidade destes equipamentos foram sugeridas e implementadas, conforme relatado a seguir:

- Revisões dos planos de manutenção e inspeções preditivas;
- Elaboração de um plano de manutenção centrado na confiabilidade (RCM) para as linhas de transmissão;
- Desenvolvimento de trabalhos para a melhoria dos processos eletrolíticos da sala de eletrólise de modo a evitar curtos-circuitos na sala;

- Projeto de melhoria de qualidade da água industrial de refrigeração dos diodos de retificação, evitando incrustações nas tubulações e perdas de troca de calor.

## 6.7 Análise de Custo

Os custos devido às falhas e ao tempo indisponível do sistema elétrico são dados pela tabela 6.7. Observa-se que o custo total das falhas é em torno de 800 vezes menor que o custo devido à indisponibilidade do sistema elétrico para a produção (lucro cessante). A composição do custo da falha envolve somente os custos de mão-de-obra das equipes corretivas. O custo devido a não disponibilidade do sistema é relativo ao lucro cessante devido às perdas produtivas de zinco na sala de eletrólise D.

Devido ao elevado valor do lucro cessante, atribuído ao processo final de produção de zinco, justifica-se economicamente às ações preventivas de manutenção, apresentado em 6.6, para a melhoria da disponibilidade e redução das ocorrências de falhas no sistema elétrico

## 7.0 CONCLUSÕES

Os capítulos anteriores possibilitaram uma abordagem sucinta sobre a teoria de confiabilidade aplicada a sistemas elétricos de potência, bem como apresentar funções, modelos matemáticos e simulações para quantificar a probabilidade de ocorrência de eventos estocásticos relacionados aos principais parâmetros de qualidade da energia em um sistema elétrico, especialmente os afundamentos e interrupções de tensão.

A teoria de confiabilidade possibilitou quantificar também os impactos financeiros e produtivos devido à indisponibilidade de um sistema elétrico industrial frente à ocorrência de afundamentos de tensão e interrupção. Estas análises são importantes para justificar investimentos financeiros para a melhoria do sistema elétrico frente aos distúrbios elétricos.

O trabalho possibilitou modelar também um sistema elétrico utilizando dados de confiabilidade extraídos de normas internacionais para o caso da inexistência destes no histórico de uma empresa. Esta metodologia permite aos setores de manutenção prever parâmetros operacionais e financeiros, através de indicadores de disponibilidade e confiabilidade, de uma planta ou sistema elétrico ainda em fase de projeto, permitindo desta forma avaliações para melhoria da confiabilidade e disponibilidade deste sistema quando em operação normal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Billinton. *Power System Reliability Evaluation*. Gordon and Breach Science Publishers, Inc. New York, 1970.
- [2] M. H. J. Bollen. *Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press Series on Power Engineering. New Jersey, 2000.
- [3] R. E. Brown. *Electric Power Distribution Reliability*. Marcel Dekker, Inc. New York, 2002.
- [4] C. C. B. Camargo. *Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica*. LTC - Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1981.
- [5] C. Cruz, U. Ribeiro. *Metodologia Científica – Teoria e Prática*. Axcel Books do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [6] IEEE. *Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices - IEEE Std 1366-2003*. IEEE Standards Board, New York, 2003.
- [7] IEEE. *Guide for Selecting and Using Reliability Predictions Based on IEEE 1413*. IEEE Standards Board, New York, 2003.
- [8] IEEE. *Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems - IEEE Std 493-2007*. IEEE-SA Standards Board, New York, 2007.
- [9] IEEE. *Reliability Data for Nuclear - IEEE Std 500-1984*. IEEE-SA Standards Board, New York, 2006.
- [10] D. C. Montgomery. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade – 4ª edição*. LTC - Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 2004.
- [11] Reliasoft. *Blocksim User's Guide*. Reliasoft Publishing. Tucson, AZ, USA, 2003.
- [12] Reliasoft. *Lambda Predict Non-Electronic Parts Libraries - NPRD-95*. Reliasoft Publishing. Tucson, AZ, USA, 2004.
- [13] Reliasoft. *Life Data Analysis Reference*. Reliasoft Publishing. Tucson, AZ, USA, 2003.
- [14] Reliasoft. *System Analysis Reference - Reliability, Availability & Optimization*. Reliasoft Publishing. Tucson/AZ, 2003.
- [15] Reliasoft. *Weibull++ User's Guide*. Reliasoft Publishing. Tucson, AZ, USA 2003.

- [16] C. A. Scapin. *Análise Sistêmica de Falhas*. EDG, Belo Horizonte, Brasil, 1999.
- [17] E. S. Seixas. *Apostila do Curso de Engenharia de Confiabilidade*. Abraman – Seção Regional IV. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [18] J. L. R. Silva, L. C. Moura. *Alternativas Tecnológicas para Mitigação de Afundamento e Interrupção Momentânea de Tensão em Cargas Sensíveis do Sistema Elétrico de Potência*. UFMG. Belo Horizonte, Brasil, 2006.