

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**PREVISÃO DA MANUTENÇÃO DE DISJUNTORES
DOS ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA PELO MÉTODO DE
CURTO-CIRCUITO PROBABILÍSTICO**

Juracy Pereira Mamede
Orientador: **Prof. Dr. Fujio Sato**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aderbal de Arruda Penteadó Junior
Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Junior
Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, para preenchimento de pré-requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Tese de Mestrado
Campinas – SP - Brasil
14 de Abril de 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M31p	<p>Mamede, Juracy Pereira Previsão da manutenção de disjuntores dos alimentadores de distribuição de energia elétrica pelo método de curto-circuito probabilístico / Juracy Pereira Mamede. -- Campinas, SP: [s.n.], 2004.</p> <p>Orientador: Fujio Sato. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Método de Monte Carlo. 2. Processo estocástico. 3. Disjuntores elétricos. 4. Curtos-circuitos. I. Sato, Fujio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
------	--

Resumo

As empresas de distribuição de energia elétrica adotam como critério para determinação do intervalo de manutenção dos disjuntores que toda falta ocorreu com o máximo valor da corrente de curto-circuito do alimentador, que é calculada por método determinístico, devido à dificuldade de se considerar as variáveis aleatórias que influenciam o valor desta corrente. Este critério reduz o intervalo de manutenção e gera manutenções, muitas vezes, desnecessárias.

Este trabalho apresenta uma nova metodologia da previsão de manutenção de disjuntores, através do cálculo de curto-circuito probabilístico para alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica. São consideradas as características físicas dos padrões de estruturas das redes para a polarização de variáveis aleatórias que geram um perfil das correntes de curto-circuito da rede.

São efetuados milhares de curto-circuito por quilômetro de rede, gerando-se a função densidade de probabilidade da corrente numa determinada área de interesse do alimentador, através do método de simulação de Monte Carlo. A avaliação da densidade acumulada de probabilidade da corrente de curto-circuito permite a otimização das manutenções dos disjuntores, mediante a utilização do valor da corrente mais provável na determinação do intervalo de manutenção, resultando na redução de custos com mão de obra e materiais, além de diminuir o tempo de indisponibilidade do equipamento.

No primeiro capítulo são apresentados os problemas da manutenção das redes de distribuição relacionadas às ocorrências das faltas, bem como a inexistência de uma metodologia apropriada para o cálculo do valor da corrente utilizado na determinação do intervalo da manutenção do disjuntor do alimentador por operações em curto-circuito.

No segundo capítulo são descritos os principais tipos de padrões das redes de distribuição utilizados na construção de alimentadores, focado neste estudo, seu comportamento em relação às faltas, característica de disjuntores pelo tipo do meio de extinção do arco elétrico e os critérios de manutenção dos mesmos.

No terceiro capítulo são tratados as definições e conceitos das expressões de cálculos, às variáveis aleatórias, bem como o algoritmo necessário para conformação da metodologia desenvolvida para o cálculo de curto-circuito probabilístico e sua utilização na determinação do intervalo da manutenção de disjuntores.

No quarto capítulo é apresentada a aplicação da metodologia desenvolvida, onde se nota a redução de custo proporcionada pelo novo intervalo de programação da manutenção de disjuntores.

As conclusões são apresentadas no quinto capítulo.

Abstract

The electric power utilities adopt a circuit breaker maintenance schedule based on maximum short-circuit current magnitude, which is calculated using a deterministic method due to difficulties of considering random variables that influence the currents in the model. This criterion reduces the maintenance interval and generates a high number of maintenance actions, which are, in most of times, unnecessary.

This work presents a new circuit breaker maintenance planning based on probabilistic short-circuit calculations of electric power distribution system radial feeders. The physical characteristics of network structure patterns are considered for polarization of random variables that generates short-circuits current profile.

Thousands of short-circuits simulations per kilometer are performed by the application of Monte Carlo simulation to generate current's probability density function in a certain area of interest of the feeder.

The evaluation of short-circuit cumulative density function allows the optimization of the circuit breaker maintenance by using the most probable current values in the determination of maintenance interval, thus resulting in reduction of costs with operation, materials and equipment's unavailability time.

In the first Chapter the maintenance problems due to faults in distribution network are presented, as well as the problem of the inexistence of an appropriate methodology for the calculation of breaker's maintenance interval due to short-circuit operations.

In the second Chapter the main types of distribution networks standards used in the construction of feeders, its behavior under fault condition; the circuit breakers, which operates with electric arch extinction and its behavior under fault condition, are described.

In the third Chapter are treated the definitions and interpretations of random variables, mathematical expressions, as well as, the algorithm developed for the proposed methodology for short-circuit calculation and determination of maintenance interval.

In the fourth Chapter an application of the developed methodology is presented, where is noticed the influence over circuit breaker maintenance schedule, mainly the cost reduction is noticed.

We present the conclusions in fifth Chapter considering the methodology of probabilistic short-circuit calculation to the distribution system, and its application for the determination of circuit breakers maintenance interval is described.

Agradecimentos

A Deus que sempre se faz presente e a mostrar o caminho justo e perfeito.

À minha esposa Cristina, as filhas Michele e Priscila pela compreensão, carinho e apoio.

Ao orientador Fujio Sato pela sua atenção, dedicação, incentivo e disponibilidade durante todo o período do desenvolvimento deste trabalho, não se limitando ser somente um orientador, mas a criar um vínculo de amizade eterna.

Aos membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Aderbal de Arruda Penteadado Junior, Prof. Dr. Carlos Alberto Castro Junior, Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari.

Ao Prof. Dr. Alexandre Rocco, coordenador da Faculdade de Engenharia Elétrica da Unisanta, pelos ensinamentos e indicação.

Aos professores do DSEE: Ariovaldo Verândio Garcia, Carlos Alberto Castro Júnior e Carlos Alberto Favarin Murari, do DSCE: Francisca Aparecida de Camargo Pires, Ernesto Ruppert Filho e José Pissolato Filho com os quais tenho a grata satisfação de poder conviver.

A colega Edna da secretaria do DSEE, as colegas da secretaria da CPG/FEEC: Noêmia, Giane e Maria José pelo carinho e amizade, além estarem sempre a nos mostrar os caminhos certos para as documentações e seus devidos prazos.

Aos colegas do DSEE: Eduardo Nobuhiro Asada e Walmir de Freitas Filho pelo incentivo e sugestões.

Ao colega da Elektro, Paulo Rezende Prudente, pelo prazer do convívio durante os estudos das disciplinas, especial ao colega Paulo de Tarso Gasparino de Souza, pelo expressivo apoio e aos colegas: Adriano Cabrino, Anis Abdelnor, Carlos Henrique Camargo Lopes, Carlos Roberto Benedik, Edson Antonio Alves, Evaldo Serra da Silva, Francisco Alfredo Fernandes, José Carlos Ferrarezi, José Francisco Resende da Silva, Luis Alessandro Alves, Paulo Rogério Ventura, Vilson Antonio Bonifácio Júnior, Wilson Hirakawa, que diretamente disponibilizaram seu precioso tempo, esclarecimentos e orientações práticas.

Sumário

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.1. Introdução	1
1.2. Intervalo da manutenção de disjuntor por curto-circuito	4

CAPÍTULO 2

SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO	8
2.1. Características gerais dos sistemas de distribuição	8
2.2. Tipos de redes de distribuição mais utilizados no Brasil	10
2.2.1. Rede subterrânea	11
2.2.2. Rede aérea com cabo isolado	11
2.2.3. Rede aérea compacta com cabo protegido	12
2.2.4. Rede aérea com cabo nu	13
2.3. Comparação dos custos entre os padrões de redes de distribuição	14
2.4. Cálculo de curto-circuito	14
2.4.1. Hipóteses simplificadoras	15
2.4.2. Curto-circuito no Sistema Elétrico de Distribuição	15
2.5. Taxas de falhas por padrão de estrutura	18
2.6. Freqüência de curto-circuito por padrão de estrutura	19
2.7. Tipos de disjuntores utilizados em cubículos de alimentadores	19
2.7.1. Disjuntores à grande volume de óleo (GVO)	20
2.7.2. Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO)	21
2.7.3. Disjuntores a vácuo	23
2.7.4. Disjuntores a SF ₆	24
2.8. Critérios da manutenção de disjuntores	26

CAPÍTULO 3

CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO PROBABILÍSTICO	28
3.1. Introdução	28
3.2. Curto-circuito probabilístico pelo método analítico	29
3.2.1. Sistema com uma fonte e uma linha radial	29
3.2.2. Sistema com uma fonte e duas linhas radiais	34
3.3. Simulação pelo método de Monte Carlo	38
3.4. Variáveis aleatórias	39
3.4.1. Escolha do nó	40
3.4.2. Escolha do local da falta	41
3.4.3. Influência da taxa de falha do ramo	42
3.4.4. Escolha do tipo de falta	43
3.4.5. Escolha da resistência de falta a terra	44
3.5. Expressões dos curtos-circuitos probabilísticos	44
3.6. Algoritmo	47

CAPÍTULO 4

TESTES E RESULTADOS	49
4.1. Desenvolvimento de rotinas de cálculos	49
4.2. Determinação da amostra	50
4.3. Determinação da quantidade de classes	53
4.4. Cálculo do intervalo de confiança e nível de significância	55
4.5. Número de operações para manutenção	56
4.6. A redução na manutenção dos disjuntores	58

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES	60
5.1. Cálculo de curto-circuito probabilístico	60
5.2. Determinação do intervalo da manutenção do disjuntor	61
5.3. Trabalhos apresentados em congressos e seminários	62
5.4. Sugestões para trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

APÊNDICE A

Efeitos do arco elétrico na operação do disjuntor	66
A.1. O arco elétrico	66
A.2. Princípio de interrupção da corrente elétrica	68
A.3. Abertura de cargas indutivas	68
A.4. Abertura em regime de curto-circuito nos terminais do disjuntor	69
A.5. Abertura em regime de curto-circuito a curta distância dos terminais do disjuntor	70
A.6. Abertura em regime de curto-circuito distante dos terminais do disjuntor	70

APÊNDICE B

Probabilidade	71
B.1. Método de Monte Carlo	71
B.2. Intervalo de confiança e nível de significância	73

APÊNDICE C

Topologia e parâmetros do alimentador utilizado nas simulações	74
C.1. Diagrama unifilar do alimentador	74
C.2. Dados da barra da subestação	75
C.3. Características do disjuntor	75
C.4. Impedâncias dos ramos do alimentador	75

Lista de Figuras e Tabelas

Figuras

Fig.1.1 – Diagrama da proteção de cubículo de alimentador na subestação.

Fig.1.2 – Perfil da corrente de curto-circuito trifásico de dois alimentadores.

Fig.1.3 – Haste cilíndrica do pólo de um disjuntor GVO.

Fig.1.4 – Pólo de um disjuntor PVO danificado.

Fig.2.1 – Diagrama unifilar de alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão.

Fig. 2.2 – Rede subterrânea.

Fig. 2.3 – Rede aérea com cabo isolado.

Fig 2.4 – Rede aérea compacta com cabo protegido.

Fig. 2.5 – Rede aérea com cabo nu.

Fig. 2.6 - Perfil das correntes de curto-circuito de um alimentador.

Fig. 2.7 - Contatos móveis em tanque aberto de um disjuntor GVO – Grande Volume de Óleo.

Fig. 2.8 – Disjuntor PVO – Pequeno Volume de Óleo.

Fig. 2.9 - Disjuntor com câmara de extinção de arco a vácuo.

Fig. 2.10 - Disjuntor com câmara de extinção a gás SF₆.

Fig. 2.11 - Número de operações do disjuntor 3AH3 em função da corrente de curto-circuito.

Fig. 3.1 – Diagrama unifilar de um sistema radial.

Fig. 3.2 – Curto-circuito trifásico em função da distância da fonte.

Fig. 3.3 – Densidade de probabilidade da variável aleatória x .

Fig. 3.4 – Densidade de probabilidade da variável aleatória I_{cc} .

Fig. 3.5 – Diagrama unifilar de um sistema com duas linhas radiais.

Fig. 3.6 – Densidade de probabilidade da variável aleatória I_{cc} .

Fig. 3.7 – Distribuição de probabilidade para escolha do nó.

Fig. 3.8 – Distribuição de probabilidade para escolha do local da falha no ramo.

Fig. 3.9 – Taxa de defeito de cada ramo associada ao tipo de rede.

Fig. 3.10 – Proporcionalidade do tipo de curto-circuito para um tipo de rede.

Fig. 3.11 – Função de distribuição uniforme para determinação da resistência de falta à terra.

Fig. 3.12 – Função de densidade de probabilidade das correntes de curtos-circuitos sem polarização.

Fig. 3.13 – Função de densidade de probabilidade das correntes de curtos-circuitos com polarização

Fig. 4.1 - Tempo de processamento em função do número de amostra por quilômetro de rede.

Fig. 4.2 - Comportamento da função densidade de probabilidade com a variação da quantidade de classes do histograma.

Fig. 4.3 - Curva da densidade acumulada de probabilidade dos curtos-circuitos.

Fig. 4.4 - Curva de operações em curto-circuito para manutenção do disjuntor 3AH5 da Siemens®.

Fig. 4.5 – Gráfico da corrente de curto-circuito e número de operação para manutenção por nível de significância.

Fig. 4.6 – Gráfico comparativo entre o percentual da corrente máxima e redução da manutenção no disjuntor.

Tabelas

Tabela 2.1 – Custo Modular Comparativo por tipo de rede.

Tabela 2.2 - Taxa de falha por tipo de rede.

Tabela 2.3 - Distribuição percentual de ocorrência de curto-circuito por tipo de rede.

Tabela 4.1 – Valor da corrente de curto-circuito na simulação variando o número de amostras.

Abreviações, Simbologia e Definições

Abreviações

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BAE	Biblioteca da Área de Engenharia
BD	Bobina do disjuntor
CPG	Comissão de Pós Graduação
DSEE	Departamento de Sistemas de Energia Elétrica
DSCE	Departamento de Sistemas e Controle de Energia
ELEKTRO	Elektro Eletricidade e Serviços S/A
FEEC	Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
GVO	Grande Volume de Óleo
NBI	Nível Básico de Impulso
NBR	Norma Brasileira
PVO	Pequeno Volume de Óleo
SED	Sistema Elétrico de Distribuição
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
TC	Transformador de Corrente
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UNISANTA	Universidade Santa Cecília dos Bandeirantes - Santos

Simbologia

<i>cp</i>	Com polarização
<i>dap</i>	Densidade acumulada de probabilidade
<i>f_dp</i>	Função densidade de probabilidade
<i>I_{cc}</i>	Correntes de curtos-circuitos
<i>I_{cc3f}</i>	Curto-circuito trifásico
<i>I_{ccff}</i>	Curto-circuito fase-fase
<i>I_{ccft}</i>	Curto-circuito fase terra
<i>I_{ccftm}</i>	Curto-circuito fase terra mínimo (para o valor de <i>Z_{fx}</i>)
<i>I_{ccftx}</i>	Curto-circuito fase terra máximo (para o valor de <i>Z_{fm}</i>)
<i>lx</i>	Local da falta
<i>L</i>	Comprimento do ramo
<i>r₀</i>	Resistência de seqüência zero
<i>r₁</i>	Resistência de seqüência positiva
<i>r₂</i>	Resistência de seqüência negativa
<i>sp</i>	Sem polarização
<i>t_{cc}</i>	Tipo do curto-circuito
<i>tp</i>	Tipo do padrão de estrutura
<i>txf</i>	Talha de falha do padrão de estrutura
<i>V</i>	Tensão pré-falta

x_0	Reatância de seqüência zero
x_1	Reatância de seqüência positiva
x_2	Reatância de seqüência negativa
Z_{fm}	Impedância mínima de falta
Z_{fx}	Impedância máxima de falta
Z_l	Impedância equivalente da rede até o local da falha
Z_s	Impedância equivalente do sistema fonte

Definições

Alimentador: rede primária radial derivada do barramento de baixa tensão de uma subestação.

Nó: ponto ao longo de um alimentador de interesse para delimitação dos ramos.

Ramo: trecho da rede primária de um alimentador compreendido entre dois nós.

Polarização: critério que defini as condições de aleatoriedade de uma variável.

Intervalo de Confiança: intervalo dos valores aceitos para o parâmetro baseado nos dados amostrais.

Nível de Significância: intervalo dos valores rejeitados quando verdadeiros.

Capítulo 1

APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo tem como objetivo apresentar um resumo dos principais problemas na manutenção das redes de distribuição relacionados às ocorrências de faltas, bem como, a inexistência de uma metodologia para o cálculo do valor mais apropriado na determinação do intervalo de manutenção dos disjuntores dos alimentadores, por operações em curto-circuito.

1.1. Introdução

As empresas do setor elétrico brasileiro passam por um estágio avançado de otimização de recursos, resultando em redução de custos operacionais. Os novos indicadores e limites de continuidade do fornecimento de energia, implantados através da resolução número 024 da ANEEL [1], bem como a exigência dos consumidores pela melhoria da qualidade e continuidade da energia, têm gerado nas empresas a necessidade de investimentos no desenvolvimento de técnicas e metodologias cada vez mais aprimoradas.

Os órgãos reguladores de energia elétrica, através de programas de Pesquisa & Desenvolvimento, incentivam a elaboração de estudos que buscam cada vez mais otimizar custo-benefício em projetos de construção, operação e manutenção dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Apesar de os projetos dos sistemas de distribuição de energia elétrica considerarem pré-requisitos de qualidade de fornecimento e confiabilidade, que visam garantir a satisfação do consumidor e adequação aos indicadores regulados, este sistema ainda estará exposto às condições diversas e imprevisíveis, que certamente ocasionarão o aparecimento de falhas em pontos aleatórios. Pode-se dizer que as falhas potenciais em sistemas de distribuição são as seguintes [2]:

- a) Isolação - As tensões nos condutores do sistema são elevadas e conseqüentemente rupturas para a terra ou entre cabos podem ocorrer por diversos motivos, tais como: projeto inadequado da isolação dos equipamentos; estruturas ou isoladores mal dimensionados; material empregado inadequado ou de má qualidade; problemas de fabricação e envelhecimento do próprio material.
- b) Mecânicos – São oriundos da natureza e provocam ação mecânica no sistema elétrico, como ação do vento; vegetação; deposição de poluentes, etc.
- c) Elétricos – São os problemas elétricos intrínsecos à natureza ou os devidos à operação do sistema: descargas atmosféricas diretas ou indiretas; sobretensões de manobras e sobretensões induzidas.
- d) Natureza Térmica – Os sobreaquecimentos nos cabos e equipamentos dos sistemas são devidos a sobrecorrentes oriundos de sobrecarga no sistema; sobretensão dinâmica no circuito; cabos deteriorados por recozimento e má conexão.
- e) Manutenção – São os decorrentes do inadequado controle de qualidade do material e serviço, tais como a substituição inadequada de peça e equipamento; pessoal não treinado ou sem qualificação; peças de reposição não adequadas; falta de controle de qualidade na compra do material e falta ou falha na inspeção da rede.

- f) Falhas de outra natureza - Atos de vandalismo; queimadas; inundações; desmoronamentos e acidentes de qualquer natureza.

Uma característica peculiar dos sistemas elétricos é a ocorrência de curto-circuito que dependem de diversos fatores, os quais podem ser oriundos do próprio sistema ou de fatores externos. Há ainda que se contar com a sazonalidade, que afetam a frequência de ocorrência de falhas em determinadas regiões e épocas do ano.

Quanto aos fatores externos, exemplos típicos são alimentadores de distribuição que passam por regiões onde ocorrem muitas queimadas da vegetação e acabam por queimar também os postes de madeira, provocando a queda dos cabos ao solo e conseqüentemente causando curto-circuito do tipo fase-terra. Em regiões urbanas são comuns as quedas de objetos dos edificios sobre cabo nu provocando curto-circuito fase-fase ou trifásico. Em regiões de campo aberto, ou onde encontramos pouca vegetação ou ainda edificações com altura inferior às redes, são comuns descargas atmosféricas diretas e indiretas, provocando múltiplos vazamentos nos isoladores, característica do curto-circuito fase-terra. Estes exemplos mostram que a sazonalidade e a região têm influência sobre o tipo e quantidade da incidência de curtos-circuitos. Para considerar contribuições precisas destes fatores ou de sua aleatoriedade, seriam necessários registros históricos detalhados de ocorrências nos alimentadores.

O sistema de proteção da maioria dos alimentadores consiste na utilização de relés de sobrecorrente para proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos entre fases e fase-terra, a exemplo do diagrama mostrado na figura 1.1. Em grandes alimentadores com pontos de redes a grande distância do cubículo fonte ou em subestações onde as correntes de curto-circuito são de baixa intensidade, poderá haver dificuldades para ajuste dos relés de proteção que controlam as operações do disjuntor. Duas são as situações que normalmente geram dificuldades nestes casos:

- 1) Quando a corrente de curto-circuito fase-fase é inferior à corrente de carga, há necessidade de elevar o ajuste dos relés de fase para permitir a passagem da corrente de carga, deixando as regiões mais distantes sem proteção, já que os valores das correntes de curto-circuito são insuficientes para sensibilizar os relés do cubículo;

2) Quando a corrente de desequilíbrio das fases é superior à de curto-circuito fase-terra. Neste caso gera-se corrente de seqüência zero indesejável no circuito de proteção, provocando a atuação do relé de neutro ou relé para faltas de alta impedância, que só deveriam atuar para ocorrência de curto-circuito.

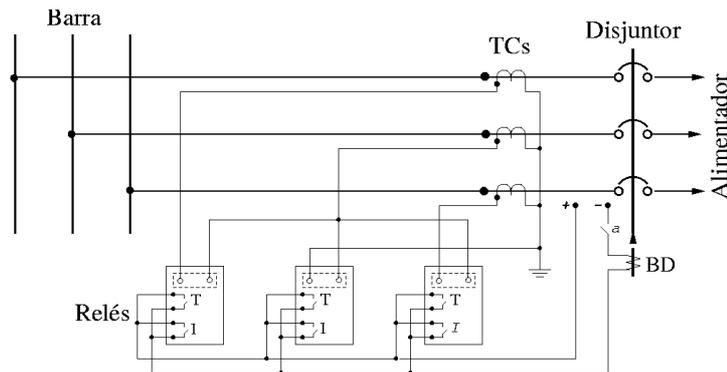


Fig.1.1 – Diagrama da proteção de cubículo de alimentador na subestação.

Um problema muito estudado em sistemas de distribuição de energia elétrica, mas que ainda não apresenta uma solução definitiva, é o relacionado à impedância da falta. A presença de defasagem entre tensão e corrente, que revela componente reativa na impedância de terra só são importantes em frequências mais elevadas, como as associadas a surtos atmosféricos. Para o cálculo de curto-circuito na frequência de distribuição de energia elétrica utiliza-se apenas a componente resistiva desta impedância. É difícil prever um valor para esta resistência no instante do curto-circuito, que pode apresentar desde um valor muito pequeno, a exemplo de quando ocorre o contato de cabo nu com estrutura metálica solidamente aterrada, até valores extremamente elevados, como o oriundo do contato do cabo energizado com árvores, cruzetas de madeira ou com o solo de areia seca.

1.2. Intervalo da manutenção de disjuntor por curto-circuito

Como a dinâmica da expansão de um Sistema Elétrico ocasiona a elevação da potência de curto-circuito em determinadas barras do sistema, surge a necessidade de verificações periódicas

quanto à capacidade de interrupção dos equipamentos de manobras e proteção, para sua adequação aos níveis de correntes das barras onde estão instalados. Para esta adequação, as empresas de distribuição de energia elétrica recalculam anualmente as potências de curtos-circuitos nas barras de suas subestações, que são utilizadas para a verificação da capacidade dos equipamentos e revisão dos programas de manutenção, principalmente os de manutenção dos disjuntores por limite de operação em curto-circuito.

Para determinação do intervalo da manutenção de disjuntores dos alimentadores de distribuição é utilizado o critério que considera que qualquer curto-circuito que provoque a operação do disjuntor contribui para a perda de sua vida útil. Após um número de operações, determinado pelo fabricante em função de características de projeto do disjuntor, haverá necessidade da intervenção da manutenção, para que as características originais sejam asseguradas.

O valor do curto-circuito utilizado na programação do intervalo de manutenção leva em consideração que todas as faltas que desligam o disjuntor, possuem a mesma intensidade. Esse critério usa o máximo valor da corrente de curto-circuito no disjuntor, que coincide com a corrente de curto-circuito da barra onde o mesmo está instalado, para a grande maioria dos alimentadores, por serem radiais.

Utilizar a maior corrente de curto-circuito da barra é uma consideração extremamente conservadora para a maioria dos alimentadores [3], já que as correntes atenuam-se para defeitos ao longo do alimentador, como é mostrado na figura 1.2. Os perfis das correntes de curto-circuito trifásico de dois alimentadores de subestações distintas: um curto com 10,90 km e corrente variando entre 1.058,0 A e 4.896,0 A, um outro mais longo com 33,53 km e corrente variando entre 488,0 A e 8.353,0 A, permitem identificar diversos valores de corrente para uma dada ocorrência. Porém, como não há um método de cálculo ou dados históricos quanto à distribuição das correntes de defeitos nos alimentadores de distribuição, convencionou-se adotar uma posição conservadora, proporcionando uma extrema preservação do equipamento.

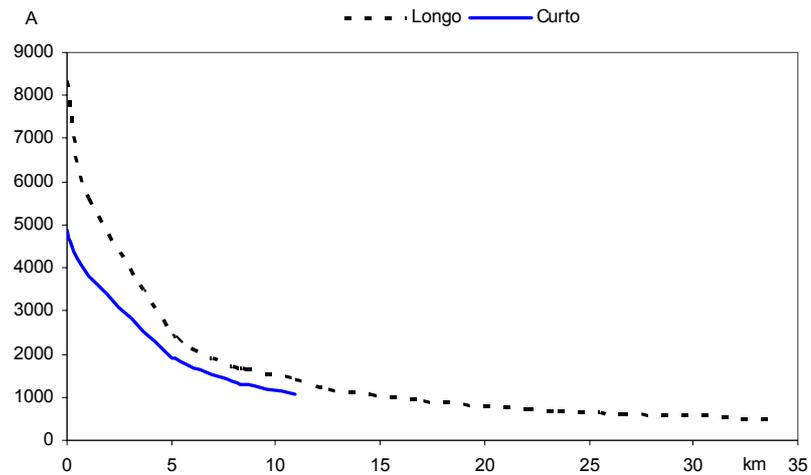


Fig.1.2 – Perfil da corrente de curto-circuito trifásico de dois alimentadores.

Durante a execução de manutenções nos disjuntores dos alimentadores de distribuição é comum diagnosticar que não há desgaste nos seus contatos móveis e fixos, principalmente em alimentadores com grandes extensões nos quais o nível de curto-circuito da subestação é muito pequeno. A figura 1.3 ilustra esta observação. Este fato deve-se ao inadequado critério utilizado para determinação do intervalo de manutenção de operações em curto-circuito, que considera que todas as operações do disjuntor interrompem o máximo valor de corrente da barra, o que não é verdade, já que os defeitos distribuem-se aleatoriamente ao longo de todos os ramos do alimentador.

Foto: Luis Alessandro



Fig.1.3 – Haste cilíndrica do pólo de um disjuntor GVO.

Porém, há que se considerar que se nenhum critério preventivo for utilizado, aguardando a ocorrência de um defeito no disjuntor para efetuar a intervenção de manutenção, é bem provável que não seja possível executar sua reparação. Um exemplo do que pode acontecer com um pólo de disjuntor, quando a periodicidade da manutenção preventiva é má dimensionada, pode ser visto na figura 1.4, que mostra o contato móvel de um disjuntor de Pequeno Volume de Óleo danificado pelo excesso de operações, sem a devida manutenção preventiva.



Fig.1.4 – Pólo de um disjuntor PVO danificado.

Capítulo 2

SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Por serem considerados fatores influentes e relevantes para os objetivos do trabalho, esse capítulo trata da descrição dos principais tipos de padrões de redes de distribuição utilizados na construção de alimentadores, do comportamento das redes em relação às faltas, dos tipos dos meios de extinção do arco elétrico nos disjuntores e do critério de sua manutenção.

2.1. Características gerais dos sistemas de distribuição

Os Sistemas Elétricos de Distribuição são constituídos por subestações, redes primárias e secundárias. As redes primárias, também conhecidas como alimentadores de distribuição, são construídas com condutores de alumínio, cobre ou aço, podendo ser isolados para a classe de tensão de 15kV, 25kV ou 34,5kV, protegidos contra danos mecânicos ou simplesmente nus, esta última uma característica da grande maioria dos alimentadores [4].

Os comprimentos dos alimentadores de distribuição variam em função da localização das cargas a serem atendidas e das condições topográficas da região. Em relação à subestação (fonte), o consumidor mais distante pode estar a dezenas de quilômetros. Um alimentador possui desde alguns metros a até algumas centenas de quilômetros de redes, somando-se ao tronco todas as suas várias derivações (ramais). São maiores, principalmente, em regiões onde existem grandes extensões rurais a serem atendidas.

Uma das características básicas que diferem um alimentador de distribuição de uma linha de transmissão é a quantidade elevada de derivações do alimentador, necessárias para atendimento das várias cargas espalhadas ao longo de uma região, como se pode notar na figura 2.1.

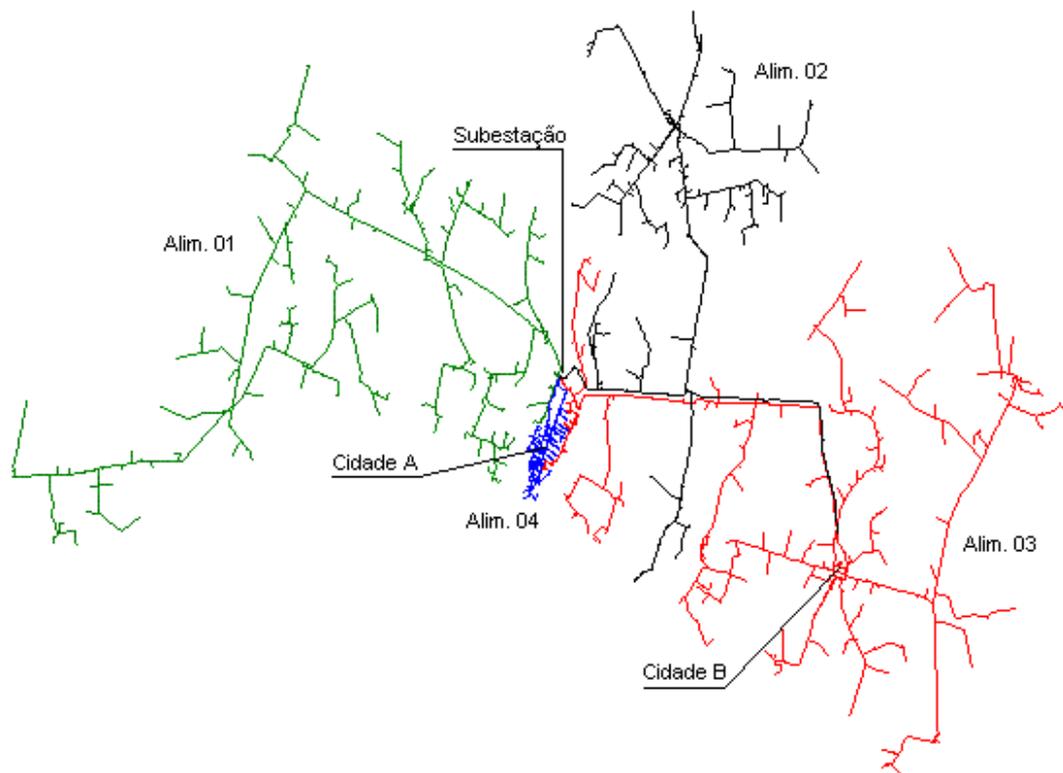


Fig.2.1 – Diagrama unifilar de alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão.

2.2. Tipos de redes de distribuição mais utilizados no Brasil

Um alimentador de distribuição de energia elétrica é construído com um determinado padrão de estrutura, escolhida para garantir a qualidade e continuidade de fornecimento exigida pela característica da carga e pelo consumidor, atendendo a legislação pertinente, ou ainda, com uma combinação de alguns padrões que atendam características particulares de locais por onde passa.

Quanto à disposição física dos condutores, são mais utilizados os padrões de estruturas para os alimentadores de distribuição subterrânea, aérea com cabos isolados, compactos protegidos ou nus.

Por ser o meio físico de sustentação dos cabos que transportam a energia elétrica, o padrão das estruturas para construção das redes de distribuição, exerce forte influência sobre a continuidade no fornecimento da energia elétrica e de sua qualidade. Porém, quanto maior a qualidade e continuidade requerida, tanto melhor deverá ser a tecnologia a ser empregada que conseqüentemente provocará uma elevação no custo do projeto, construção, operação e manutenção.

Em grande parte, os alimentadores são construídos com estruturas aéreas e condutores nus dispostos horizontalmente através da utilização de cruzetas de madeira. Atualmente, a escassez de madeira de lei para confecção de cruzetas, aliada a problemas ambientais causados pela sua extração, vem equiparando o preço dessas estruturas com as novas alternativas de rede com cabos compactos protegidos.

Considerando-se os padrões das estruturas mais representativas na maioria dos alimentadores de distribuição, as descrições a seguir, evidenciam suas características quanto ao desempenho e aplicação.

2.2.1. Rede subterrânea

Tem aplicação específica em local onde a arquitetura ou uma baixa taxa de falha são exigidos. Possui custo relativo de projeto muito elevado, quando comparados aos demais padrões. Há baixíssima probabilidade de ocorrências de curto-circuito trifásico e fase-fase, sendo a maioria das ocorrências associadas à falta para terra. Os cabos são isolados e podem ser dispostos em canaletas, como mostrado na figura 2.2, em dutos ou em contato direto com o solo ou com a água.

Foto: Wilson Hirakawa



Fig. 2.2 – Rede subterrânea.

2.2.2. Rede aérea com cabo isolado

É empregado principalmente em região onde há um grande potencial de risco de contato acidental, pouco espaço aéreo, necessidade de passar vários circuitos por uma estrutura de sustentação e onde é requerido bom índice de continuidade. Têm características que se aproximam de um padrão de rede subterrânea, com implicações arquitetônicas, mas com uma sensível redução no custo de implantação. Possuem cabos isolados, normalmente dispostos em estruturas de sustentação simples, como mostrado na figura 2.3.

Foto: Juracy Mamede



Fig. 2.3 – Rede aérea com cabo isolado.

2.2.3. Rede aérea compacta com cabo protegido

É construída principalmente em regiões onde há riscos de falhas provocadas pelo meio ambiente vegetal, sendo um padrão intermediário do ponto de vista da relação custo-benefício, entre as redes com cabo nu e aquelas com cabo isolado. Os cabos são protegidos mecanicamente contra abrasão, não possuem isolamento para a classe de tensão de operação e estão dispostos em estruturas de sustentação para redes aéreas na posição horizontal ou losangular, com um cabo mensageiro, como mostrado na figura 2.4.

Foto: Juracy Mamede



Fig 2.4 – Rede aérea compacta com cabo protegido.

2.2.4. Rede aérea com cabo nu

É o padrão mais utilizado, com menor custo relativo de projeto, mas custo operacional maior em função de expor as fases a perturbações. Os cabos são geralmente dispostos em estruturas de sustentação para redes aéreas na posição horizontal, como mostrado na figura 2.5.

Foto: Juracy Mamede



Fig. 2.5 – Rede aérea com cabo nu.

2.3. Comparação dos custos entre os padrões de redes de distribuição

No Brasil predomina a construção de sistemas de distribuição com redes aéreas com cabos nus. A tabela 2.1 [5] mostra uma comparação de custos por unidade monetária da construção, com os principais tipos de redes utilizados nos sistemas de distribuição brasileiro, tomando como referência a rede aérea com cabos nus. Vale observar que em função dos valores apresentados, a viabilidade econômica tem forte influência para utilização em larga escala da rede aérea com cabos nus.

Tabela 2.1 – Custo Modular Comparativo por Tipo de Rede.

Tipo de Rede	Custo por Unidade Monetária
Rede Subterrânea	7,00 a 13,00
Rede Aérea com Cabos Isolados	1,85
Rede Aérea Compacta com Cabos Protegidos	1,30
Rede Aérea com Cabos Nus	1,00

2.4. Cálculo de curto-circuito

Para a maioria dos estudos de um sistema elétrico se faz necessário o conhecimento dos valores das correntes de curto-circuito, tais como para [6]:

- a. Determinação da capacidade de interrupção dos equipamentos de chaveamento;
- b. Cálculo de ajustes do sistema de proteção;
- c. Seleção de reatores limitadores de corrente e outros equipamentos;
- d. Cálculo do esforço mecânico nos elementos estruturais dos equipamentos sujeitos às forças eletromagnéticas devidas à corrente de curto-circuito.

2.4.1. Hipóteses simplificadoras

Nas simulações de curtos-circuitos adotam-se certas simplificações na modelagem da rede elétrica que facilitam os processos de cálculos computacionais sem, no entanto, introduzir erros grosseiros nos valores calculados [6].

As simplificações adotadas, normalmente, são:

- todas as máquinas síncronas do sistema operando com as tensões 1.0 p.u. ângulo zero, ou seja, desprezar a corrente de regime pré-falta;
- as cargas são desprezadas;
- considera-se todo transformador operando na derivação nominal;
- considera-se a rede de seqüência negativa idêntica à rede de seqüência positiva.

Além dessas hipóteses, há alguns fatores cujas indeterminações decorrem do próprio tipo de problema, tais como:

- curto-circuito é admitido como franco;
- simula-se somente a alternativa de geração máxima dada à dificuldade de prever a configuração de geração mínima;
- as impedâncias de seqüência zero (próprias e mútuas) em linha de transmissão e distribuição são parâmetros muito aproximados, pela sua grande dependência do valor da resistência de aterramento, afetada pela resistividade do solo, que pode variar na própria região em estudo, dependendo da formação geológica do solo.

2.4.2. Curto-circuito no Sistema Elétrico de Distribuição

Diversos aplicativos e rotinas estão disponíveis para os cálculos de curtos-circuitos em microcomputadores em empresas de energia elétrica e Universidades. Utiliza-se a formulação

determinística, que pode ser generalizada através da expressão (2.1). Esta expressão mostra que as correntes de curto-circuito num Sistema Elétrico de Distribuição – SED são funções dos parâmetros elétricos da rede, da tensão pré-falta, do local da falta e do tipo de falta que se deseja calcular.

$$I_{cc}(l, t_{cc}) = f[V, (Z_s | t_{cc}), (Z_l | l, t_{cc})] \quad (2.1)$$

onde:

$I_{cc}(l, t_{cc})$ – correntes de curto-circuito para um local e tipo;

V – tensão pré-falta da fonte;

Z_s – impedância equivalente da fonte;

Z_l – impedância equivalente da rede até o local da falta;

l – local da falta e,

t_{cc} – tipo de curto-circuito.

A resolução desses cálculos permite fazer a representação gráfica dos perfis das correntes de curto-circuito trifásica (I_{cc3f}), fase-fase (I_{ccff}), fase-terra (I_{ccft}) e fase-terra mínima (I_{ccftm}), apresentados na figura 2.6, para o alimentador utilizado neste trabalho, desde o do ponto de instalação do disjuntor até o ponto mais distante deste. Notar que a corrente de curto-circuito fase-terra foi calculada para valores de máxima e mínima resistência de falta à terra, que determinam uma região entre dois extremos de corrente de falta à terra, dificultando a análise de uma ocorrência, bem como a especificação e ajuste dos equipamentos de proteção, devido à possibilidade de assumir inúmeros valores de corrente entre o mínimo e o máximo, notadamente para faltas mais próximas do disjuntor.

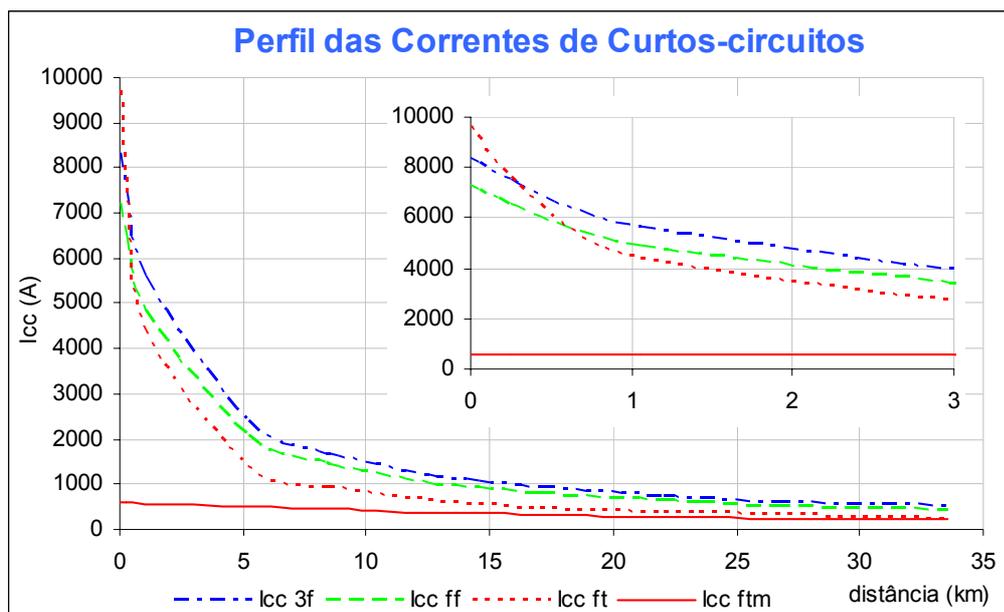


Fig. 2.6 - Perfil das correntes de curto-circuito de um alimentador.

O conhecimento das correntes de curto-circuito atende a diversos objetivos importantes na análise do SED [7], [2]. Alguns dos mais importantes são relacionados a seguir:

- Conhecer a dimensão do seu valor;
- Dimensionar a estrutura em relação a suportabilidade mecânica do efeito dinâmico do curto-circuito;
- Dimensionar o disjuntor quanto à seção dos contatos e capacidade disruptiva da câmara de extinção do arco-elétrico;
- Dimensionar o transformador de corrente (TC) quanto ao nível de saturação da curva de magnetização definida pela sua classe de exatidão;
- Efetuar a coordenação dos relés;
- Analisar sobretensão na frequência industrial devido a curto-circuito;
- Conhecer o tempo de atuação do relé, conseqüentemente o tempo da eliminação do defeito, para analisar perturbações relacionadas às harmônicas e à estabilidade dinâmica do sistema elétrico.

2.5. Taxas de falhas por padrão de estrutura

Ao escolher um determinado padrão de estrutura para a construção da rede de distribuição, busca-se aquele que irá satisfazer a necessidade técnico-econômica e que será capaz de atender a carga ou exigências do consumidor, levando-se em consideração diversas características técnicas do padrão adotado, principalmente a classe de tensão, NBI - Nível Básico de Impulso suportável, espaço físico disponível e carregamento do circuito.

A definição de falha como “*término da capacidade de um item desempenhar a função requerida*” e de falha aleatória como “*qualquer falha cuja causa ou mecanismo faça com que seu instante de ocorrência se torne imprevisível, a não ser no sentido probabilístico ou estatístico*” na NBR-5462 [8], indica que haverá sempre a possibilidade de ocorrência de uma falha, por mais remota que ela seja e mesmo que sejam tomados todos os cuidados com a rede e equipamentos.

A tabela 2.2 apresenta valores da taxa de falha por tipo de rede de distribuição, utilizados neste estudo, que foram obtidos por consenso de equipes de estudos de manutenção, proteção e planejamento em sistemas elétricos de uma empresa de distribuição de energia elétrica paulista. Os valores, inicialmente apresentados na unidade falha por quilômetro de rede por ano, foram transformados em porcentagem para que fosse possível aplicá-los sem restrições de unidades.

Tabela 2.2 - Taxa de falha por tipo de rede.

Tipo de Rede	TxFalha%
Rede Subterrânea	2,86
Rede Aérea com Cabos Isolados	5,71
Rede Aérea Compacta com Cabos Protegidos	34,29
Rede Aérea com Cabos Nus	57,17

2.6. Frequência de curto-circuito por padrão de estrutura

As correntes de curtos-circuitos ocorrem com frequência nos sistemas de distribuição e são devidas às falhas ou defeitos em materiais, equipamentos, operações indevidas e acidentais, podendo ser classificadas, basicamente, como fase-terra, fase-fase e trifásica, correspondendo, nesta ordem, à frequência de incidência. Os respectivos valores, porém, variam em ampla faixa que depende das características intrínsecas da própria rede e da capacidade de curto-circuito da fonte.

Os valores da distribuição percentual de ocorrência de curto-circuito por tipo de rede utilizados neste estudo são os apresentados na tabela 2.3, e foram obtidos por consenso de equipes de estudos de manutenção, proteção e planejamento de sistemas elétricos de uma empresa de distribuição de energia elétrica paulista. Comparados com os valores apresentados no livro “Curto-Circuito” de Geraldo Kindermann [2], apresentam boa aderência para redes aéreas com cabos nus. Para os demais tipos de redes não foram encontradas referências literárias para comparação.

Tabela 2.3 - Distribuição percentual de ocorrência de curto-circuito por tipo de rede.

Tipo de Rede	Icc3F%	IccFF%	IccFT%
Rede Subterrânea	1	2	97
Rede Aérea com Cabos Isolados	2	6	92
Rede Aérea Compacta com Cabos Protegidos	3	10	87
Rede Aérea com Cabos Nus	6	21	73

2.7. Tipos de disjuntores utilizados em cubículos de alimentadores

A função principal de um disjuntor é interromper as correntes de falta de um determinado circuito durante o menor intervalo de tempo possível, porém, são também solicitados a interromper corrente de circuitos operando a plena carga, a vazio e ainda religar os mesmos circuitos em condições de operação normal ou em falta [9].

Os disjuntores são instalados em conjunto com os respectivos relés, que são os elementos responsáveis pela detecção das correntes elétricas do circuito, que depois de comparadas com valores previamente ajustados, podem enviar ou não a ordem de comando para o desligamento do circuito. O relé atribui ao disjuntor a característica de proteção, sem a qual e fica reduzido apenas a uma excelente chave de manobra.

Os tipos construtivos dos disjuntores dependem dos meios utilizados para a extinção do arco. Existe no mercado grande quantidade de marcas bem como diferentes tipos de disjuntores, atendendo às mais diversas especificações técnicas, para todos os tipos de particularidades das possíveis aplicações. Independentemente das demais características os disjuntores podem ser classificados quanto às formas construtivas do sistema de interrupção e extinção do arco elétrico.

2.7.1. Disjuntores à grande volume de óleo (GVO)

Neste tipo de disjuntor os contatos dos três pólos se localizam no interior de um único recipiente contendo uma grande quantidade de óleo mineral isolante, conforme mostrado na figura 2.7. O recipiente, ou simplesmente tanque, é constituído de chapa de aço robusta e contém, na parte superior, uma tampa metálica com guarnições em borracha especial que garantem completa vedação do conjunto.

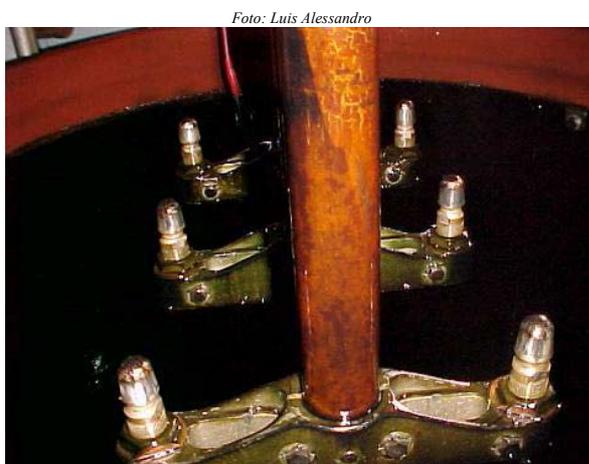


Fig. 2.7 - Contatos móveis em tanque aberto de um disjuntor GVO – Grande Volume de Óleo.

Os contatos de cada pólo são instalados no interior de uma pequena câmara de extinção constituída de um tubo de fenolite robusto e altamente resistente. Os contatos estão profundamente imersos no volume de óleo, o que impede, dentro dos limites da capacidade de interrupção do disjuntor, o restabelecimento do arco através do resfriamento eficaz efetuado pelos gases ascendentes. A superfície dos contatos é prateada com a finalidade de evitar a oxidação, que acarretaria elevada resistência de contato e conseqüentemente elevação de temperatura.

Hoje a tecnologia dos disjuntores GVO está ultrapassada, apesar de sua elevada capacidade de ruptura e ótimo desempenho. Fatores como dificuldade de manutenção, tamanho e custo, justificam o seu desuso.

2.7.2. Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO)

Neste tipo de disjuntor os contatos são instalados no interior de câmaras de extinção individualmente separadas, montadas juntamente com a caixa do mecanismo de comando em estrutura de cantoneiras de ferro, como mostra a figura 2.8.

Foto: José Ferrarezi



Fig. 2.8 – Disjuntor PVO – Pequeno Volume de Óleo.

Os pólos que contêm a câmara de extinção, o contato fixo, o móvel e o líquido de extinção do arco são os principais elementos do disjuntor. Cada pólo é dotado de um bujão com um orifício superior para enchimento e outro inferior para drenagem do óleo isolante, cujo nível pode ser controlado através de um visor de material transparente, instalado na altura da câmara de expansão. O óleo utilizado neste tipo de disjuntor pode ser do tipo parafínico ou naftênico.

Na câmara de extinção do arco se processa a interrupção da corrente elétrica do circuito. É constituída basicamente de três partes: o compartimento superior onde são extintas as correntes de pequena intensidade; a base da câmara, que permite, juntamente com o cabeçote, a injeção dirigida do óleo sobre o arco resultante de correntes de grande intensidade e o canal anelar, destinado a conduzir o óleo até o arco, em alta pressão.

O contato fixo e o móvel são as partes do disjuntor de maior desgaste. Sua vida útil está diretamente ligada ao número de interrupções realizadas pelo disjuntor e ao valor da corrente interrompida. O contato móvel é constituído de uma haste cilíndrica oca, de cobre, dotada de uma ponta resistente às altas temperaturas resultantes do arco elétrico que pode atingir cerca de 10.000°C.

2.7.3. Disjuntores a vácuo

Os disjuntores a vácuo são especialmente utilizados em instalações onde a frequência de manobra é intensa. Não é aconselhável o uso de disjuntores a óleo nesses casos, face sua necessidade de manutenção mais frequente e onerosa, quando comparado ao disjuntor a vácuo.

São construídos com três pólos individualmente instalados através de isoladores suportes em epóxi, caixa de manobra dotada de todos os mecanismos destinados à operação do equipamento, como pode ser visto na figura 2.9. Cada pólo é constituído de uma câmara a vácuo, apoiada em suas extremidades por isoladores cerâmicos, que ocupa a parte central do pólo. Os contatos fixos e móveis são montados no interior da câmara de vácuo.

Foto: Luis Alessandro

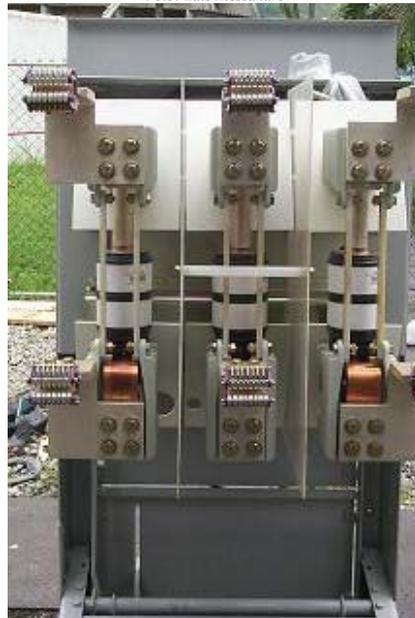


Fig. 2.9 - Disjuntor com câmara de extinção de arco a vácuo.

A câmara de vácuo apresenta um funcionamento bastante peculiar. Mediante a separação dos contatos, surge um arco de grande intensidade entre eles, acompanhado de uma certa quantidade de vapor metálico, resultante de pequena decomposição dos contatos, formando um plasma. Quando a

corrente passa pelo zero natural, o arco se extingue, provocando a deposição do vapor metálico sobre as superfícies dos próprios contatos. Nesse momento, se restabelece a rigidez dielétrica entre eles. A intensidade com que se forma o vapor metálico durante a disrupção é diretamente proporcional à intensidade da corrente que é interrompida. Desse modo, corrente de pequena intensidade não mantém a descarga do vapor metálico, sendo interrompidas antes mesmo da sua passagem pelo zero natural, o que provoca sobretensões elevadas no sistema. São empregados materiais de liga especial, na composição dos contatos, que podem interromper correntes de baixo valor, da ordem de 5,0 A.

O processo de formação e condensação dos vapores metálicos é realizado em tempo extremamente curto, na faixa de microssegundos. A queda de tensão resultante da formação do arco fica limitada a praticamente 200 V.

O arco não sofre nenhum processo de resfriamento durante a sua extinção, o que diferencia substancialmente esse tipo de disjuntor de muitos outros. Para evitar que o arco provoque sobreaquecimento em determinados pontos dos contatos, estes são projetados de modo que o campo magnético resultante da formação do próprio arco o faça deslocar-se sobre as superfícies daqueles pontos.

Os disjuntores a vácuo são extremamente eficientes para interromper correntes em média tensão. Para tensões mais elevadas, como a extra-alta tensão, ainda há necessidade de aperfeiçoamento na tecnologia de fabricação desses equipamentos.

2.7.4. Disjuntores a SF₆

O princípio básico de interrupção em gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre) se fundamenta em sua capacidade de levar rapidamente a zero a condutibilidade elétrica do arco, absorvendo os elétrons livres e restabelecer com extrema velocidade a rigidez dielétrica depois de cessados os fenômenos que motivaram a formação desse arco. Isso porque o SF₆ é um gás eletronegativo, o que lhe propicia facilidade na captura dos elétrons livres presentes no plasma do arco elétrico, reduzindo sua condutibilidade à medida que a corrente tende ao zero natural.

Por ser um gás extremamente pesado e incolor deve-se tomar cuidado ao manipulá-lo em ambientes fechados, pois, caso haja vazamento, o SF_6 se acumula nas regiões inferiores do ambiente, substituindo o ar podendo provocar asfíxia quando atinge um determinado nível. Em contato com a água pode formar substâncias extremamente corrosivas, que atacam os materiais metálicos nos quais estão contidos. Contudo, não é tóxico e não apresenta cheiro, o que pode não ser uma boa característica quanto ao aspecto de segurança do seu manuseio.

Durante a operação do disjuntor, há decomposição de certa quantidade de SF_6 , produzindo produtos tóxicos como os fluoretos SF_2 e SF_4 , que se recombina logo em seguida, originando substâncias não tóxicas.

Esses equipamentos são montados no interior de carcaças metálicas e estão mecânica e eletricamente unidas, como mostrado na figura 2.10, formando um conjunto compacto dentro do qual se injeta determinada quantidade de SF_6 sob pressão constante de cerca de 3 kg/cm^2 . Todo esse sistema é supervisionado para controlar quaisquer vazamentos do gás armazenado.



Fig. 2.10 - Disjuntor com câmara de extinção a gás SF_6 .

2.8. Critérios da manutenção de disjuntores

A programação da manutenção preventiva dos disjuntores depende basicamente de 03 (três) condições:

- a) Tempo de operação;
- b) Número de abertura e fechamento em manobras;
- c) Número de aberturas em curto-circuito.

O tempo de operação é determinado em função da degradação de materiais como óleos, borrachas de vedação, etc e do acúmulo de sujeira ou poluição.

O número de abertura e fechamento em manobras é um valor determinado em função da avaliação do desgaste das peças móveis e é informado pelo fabricante de acordo com o projeto.

O número de aberturas em curto-circuito pode ser definido com base na experiência de manutenção ou determinado em função do nível de curto-circuito onde o equipamento opera [10].

A condição mais crítica para efeito da manutenção em disjuntor de alimentador de distribuição é aquela que leva em consideração as operações em curto-circuito, devido às várias faltas que ocorrem, em consequência, principalmente, da grande extensão da rede. São também as que provocam mais desgaste nos contatos (móveis e fixos) e nas câmaras de extinção de arco, exigindo assim, manutenção preventiva mais constante. O efeito do arco elétrico sobre o disjuntor é tratado no apêndice A.

A interrupção de elevadas correntes na faixa de tempo de alguns milissegundos até alguns segundos, quando em operação sob falta, provoca desgaste acelerado dos contatos e das câmaras de extinção de arco, além do desgaste no próprio mecanismo de comando, exigindo diminuição do intervalo de manutenção. O desgaste é proporcional a cada curto-circuito interrompido pelo disjuntor, levando em consideração sua magnitude e tempo da interrupção.

A determinação do número de operações para manutenção pode ser efetuada com a utilização do gráfico mostrado na figura 2.11 (disjuntor 3AH3 15 kV da Siemens[®], 1999), a partir do conhecimento da corrente de curto-circuito que o disjuntor irá interromper. A questão é: qual o valor dessa corrente? Na prática considera-se a máxima corrente eficaz simétrica obtida para um curto-circuito na saída do disjuntor. É um critério determinístico e bastante conservador, já que em um alimentador de distribuição, as faltas ocorrem ao longo do alimentador [11].

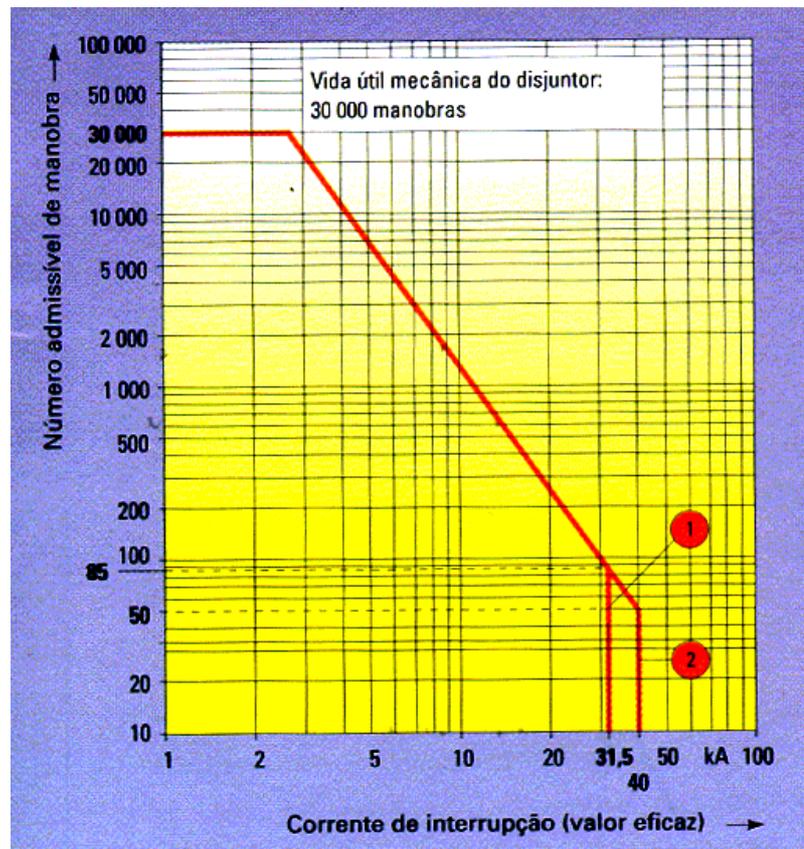


Fig. 2.11 - Número de operações do disjuntor 3AH3 em função da corrente de curto-circuito.

Em alimentadores radiais de distribuição, as ocorrências das faltas podem contribuir tanto mais, quanto maior o valor do curto-circuito, para a degradação dos contatos dos disjuntores e é fácil observar que esses curtos-circuitos estão distribuídos ao longo do alimentador. Também é possível concluir que toda corrente de curto-circuito que circula pelos relés de proteção do cubículo e atinge o limite de tempo para comando de abertura, fará o disjuntor operar.

Capítulo 3

CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO PROBABILÍSTICO

Neste capítulo tem-se com principais objetivos tratar as definições e conceitos do cálculo de curto-circuito probabilístico para Sistema Elétrico de Distribuição, definir as variáveis aleatórias, apresentar as expressões de cálculo e o algoritmo necessário para a conformação da metodologia desenvolvida para o cálculo de curto-circuito, utilizada na determinação do intervalo de manutenção de disjuntores.

3.1. Introdução

Dois métodos são utilizados para estudo de curto-circuito probabilístico, o método analítico e o método de Monte Carlo. O método analítico baseia-se nas expressões derivadas da teoria da probabilidade e é aplicável somente para curto-circuito trifásico, fornecendo resultados com boa precisão e custo de processo computacional reduzido. Era um método alternativo, em virtude de o

método de Monte Carlo exigir recursos computacionais maiores do que os disponíveis na época. O tratamento probabilístico das correntes de curtos-circuitos foi iniciado praticamente a partir do início da década de 80 por pesquisadores ligados a entidades canadenses, como G. L. Ford, M. A. El-Kady e outros [12]. O método de Monte Carlo baseia-se em processo de geração de números aleatórios a partir de uma dada função de distribuição. Esta simulação é utilizada para obter a função densidade de probabilidade (fdp) das correntes de curto-circuito de uma determinada área de interesse do sistema elétrico.

A análise através de curto-circuito probabilístico em um sistema de potência tem como objetivo, em princípio, fornecer a distribuição de probabilidade dessas correntes num determinado nó ou região de interesse particular. Esta distribuição de probabilidade é apresentada em forma de histograma ou gráfico. É determinada acumulando-se as frequências dos valores de curtos-circuitos para as diversas faixas do histograma. Para se ter precisão aceitável no resultado desses cálculos, são necessárias milhares de simulações de curto-circuito. O histograma pode ser transformado subseqüentemente em uma função densidade de probabilidade e densidade acumulada de probabilidade (dap), conforme o interesse para um determinado estudo.

3.2. Curto-circuito probabilístico pelo método analítico

O cálculo de curto-circuito probabilístico pelo método analítico será apresentado a seguir, com o objetivo de facilitar a interpretação do método de Monte Carlo.

3.2.1. Sistema com uma fonte e uma linha radial

Considere o sistema da figura 3.1, como definido em [3], no qual deseja-se analisar a ocorrência de um curto-circuito trifásico.

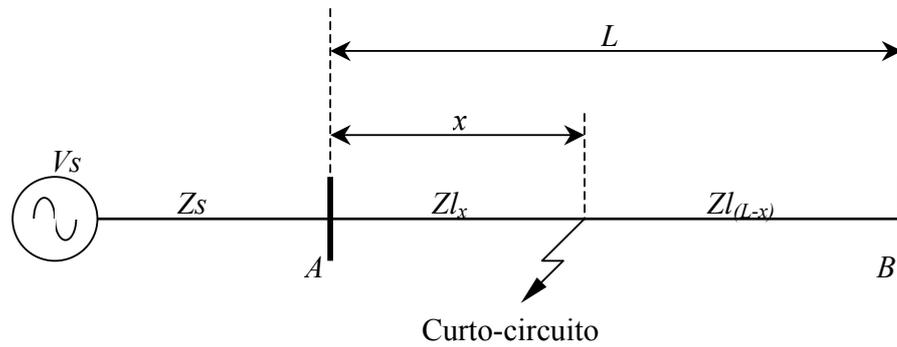


Fig. 3.1 – Diagrama unifilar de um sistema radial.

A ocorrência de um curto-circuito trifásico, à distância x da barra A é calculada deterministicamente pela equação (3.1)

$$I_{cc} = \frac{V_s}{Z_s + Zl_x} \quad (3.1)$$

Onde:

V_s – tensão fase-neutro da fonte;

Z_s – impedância de seqüência positiva da fonte;

Zl – impedância série de seqüência positiva da linha, por unidade de comprimento;

L – comprimento total da linha.

Esta equação permite determinar a variação da corrente de curto-circuito trifásico em função da distância, como mostrado qualitativamente na figura 3.2.

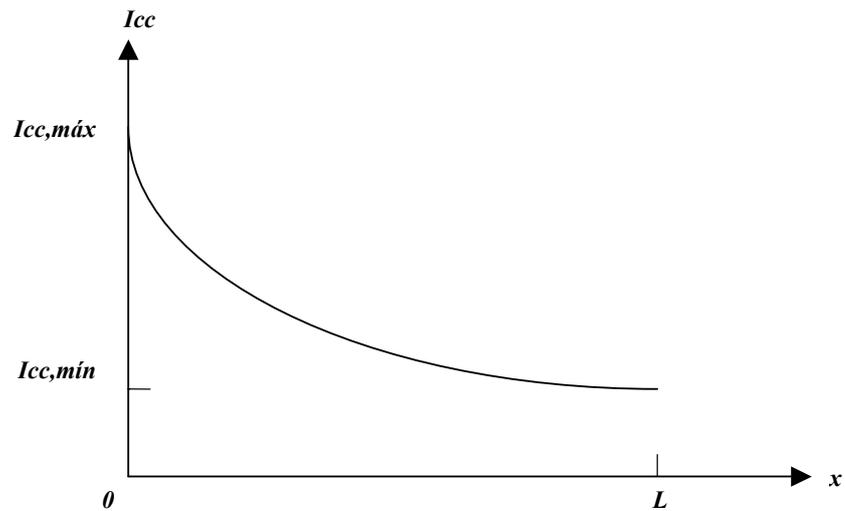


Fig. 3.2 – Curto-circuito trifásico em função da distância da fonte.

Os valores máximo e mínimo são determinados por:

$$I_{cc,máx} = \frac{V_s}{Z_s} \quad (3.2)$$

$$I_{cc,mín} = \frac{V_s}{Z_s + Zl \cdot L} \quad (3.3)$$

Estas informações, entretanto, não respondem a uma das perguntas importantes que influencia no processo de decisão, qual seja: quais as probabilidades de ocorrências das correntes máxima e mínima de curto-circuito?

Pela análise da equação (3.1) verifica-se que a corrente de curto-circuito depende de duas características do sistema (Z_s e Zl), de uma característica operacional (V_s , normalmente variando numa faixa restrita, o que permite considerá-lo constante) e de uma característica de natureza aleatória (local do curto-circuito, ou seja, distância entre a barra em análise e o ponto de curto-circuito).

Assim sendo, a corrente de curto-circuito também passa a ser uma variável aleatória de característica a determinar.

Conhecendo-se a densidade de probabilidade do local do curto-circuito na linha ($p(x)$), a densidade de probabilidade da magnitude da corrente de curto-circuito ($p(I_{cc})$) pode ser obtida, usando uma relação conhecida da teoria da probabilidade [13]:

$$p(I_{cc}) = p(x) \left| \frac{dx}{dI_{cc}} \right| \quad (3.4)$$

Considerando-se uma distribuição uniforme do curto-circuito na linha de transmissão, a densidade de probabilidade da variável aleatória x é ilustrada na figura 3.3 e a sua correspondente função representada pela equação (3.5).

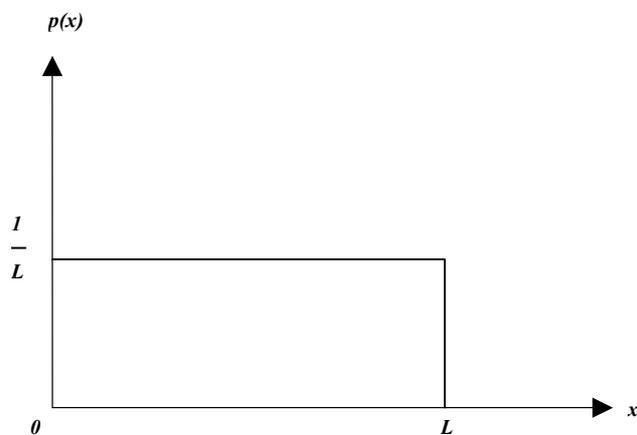


Fig. 3.3 – Densidade de probabilidade da variável aleatória x .

$$p(x) = \frac{1}{L} \quad (3.5)$$

Pela equação (3.1) tem-se:

$$x = \frac{V_s}{Z_s \cdot I_{cc}} - \frac{Z_s}{Z_l} \quad (3.6)$$

Derivando x em relação a I_{cc} :

$$\frac{dx}{dI_{cc}} = \frac{V_s}{Z_l \cdot I_{cc}^2} \quad (3.7)$$

Então,

$$\left| \frac{dx}{dI_{cc}} \right| = \frac{V_s}{Z_l \cdot I_{cc}^2} \quad (3.8)$$

Substituindo as equações (3.5) e (3.8) na equação (3.4) resulta:

$$p(I_{cc}) = \frac{V_s}{Z_l \cdot L \cdot I_{cc}^2} \quad (3.9)$$

Esta função é ilustrada na figura 3.4 e satisfaz as seguintes condições:

$$\frac{V_s}{Z_s + Z_l \cdot L} \leq I_{cc} \leq \frac{V_s}{Z_s} \quad (3.10)$$

ou,

$$I_{cc, \min} \leq I_{cc} \leq I_{cc, \max} \quad (3.11)$$

que garante que I_{cc} estará entre um valor mínimo e máximo. Ainda,

$$\int_{I_{cc, \min}}^{I_{cc, \max}} p(I_{cc}) dI_{cc} = 1,0 \quad (3.12)$$

que garante que a área sob a função representada na figura 3.4 é igual a 1,0. Ainda,

$$p(I_{cc}) = 0, \text{ para } I_{cc} < I_{cc,\text{mín}} \text{ e } I_{cc} > I_{cc,\text{máx}} \quad (3.13)$$

que garante que para todo I_{cc} fora do intervalo mínimo e máximo não haverá valor de curto-circuito.

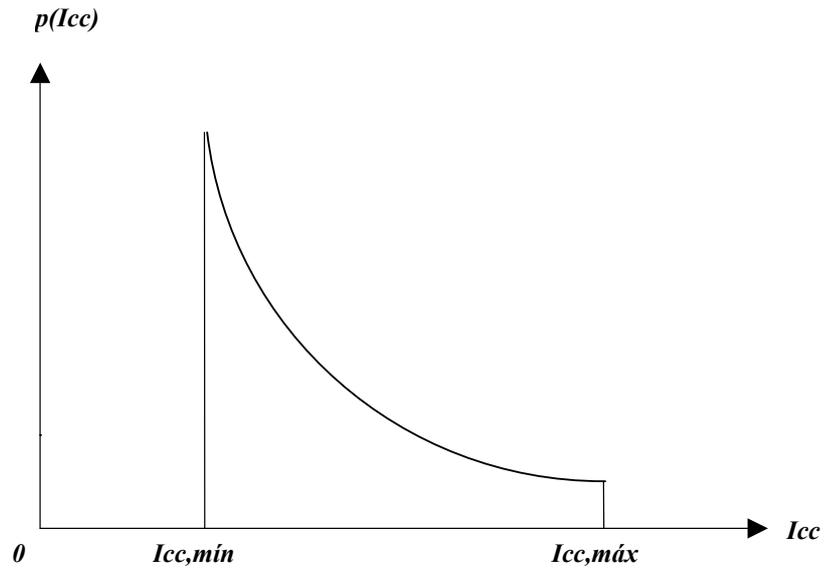


Fig. 3.4 – Densidade de probabilidade da variável aleatória I_{cc} .

3.2.2. Sistema com uma fonte e duas linhas radiais

Considerando o sistema da figura 3.5, que possui duas linhas partindo de uma mesma barra, a relação básica desenvolvida para uma linha radial aplica-se para cada linha [12].

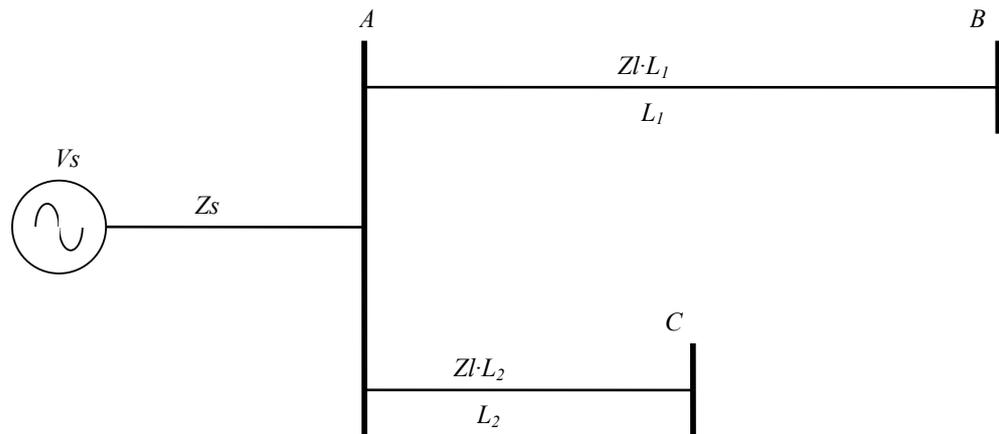


Fig. 3.5 – Diagrama unifilar de um sistema com duas linhas radiais.

pela equação (3.9), para a linha $A-B$, calcula-se:

$$p_1(Icc) = \frac{V_s}{Zl \cdot L_1 \cdot Icc^2} \quad (3.14)$$

e para a linha $A-C$:

$$p_2(Icc) = \frac{V_s}{Zl \cdot L_2 \cdot Icc^2} \quad (3.15)$$

Estas duas equações definem a densidade de probabilidade da magnitude da corrente, dado que o curto-circuito pode ocorrer nas linhas L_1 e L_2 , respectivamente.

A densidade de probabilidade da magnitude da corrente total é dada por:

$$p_t(Icc) = p(Icc|ccL_1) \cdot P(ccL_1) + p(Icc|ccL_2) \cdot P(ccL_2) \quad (3.16)$$

onde $p(Icc|ccL_1)$ e $p(Icc|ccL_2)$ são respectivamente as densidades de probabilidade condicional das linhas L_1 e L_2 , enquanto $P(ccL_1)$ e $P(ccL_2)$ são probabilidades de ocorrência de curto-circuito nas linhas L_1 e L_2 .

Sendo:

$$p(Icc|ccL_1) = p_1(Icc) \quad (3.17)$$

$$p(Icc|ccL_2) = p_2(Icc) \quad (3.18)$$

$$P(ccL_1) + P(ccL_2) = 1,0 \quad (3.19)$$

tem-se:

$$p_i(Icc) = p_1(Icc) \cdot P(ccL_1) + p_2(Icc) \cdot P(ccL_2) \quad (3.20)$$

Na falta de uma análise estatística do histórico consistente do sistema que permita estimar os valores das probabilidades de ocorrências de curto-circuito nas linhas, é razoável pressupor que elas sejam proporcionais aos seus comprimentos.

Assim,

$$P(ccL_1) = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad (3.21)$$

$$P(ccL_2) = \frac{L_2}{L_1 + L_2} \quad (3.22)$$

Portanto:

$$p_i(Icc) = p_1(Icc) \frac{L_1}{L_1 + L_2} + p_2(Icc) \frac{L_2}{L_1 + L_2} \quad (3.23)$$

As funções $p_1(I_{cc})$, $p_2(I_{cc})$ e $p_t(I_{cc})$ são mostradas na figura 3.6.

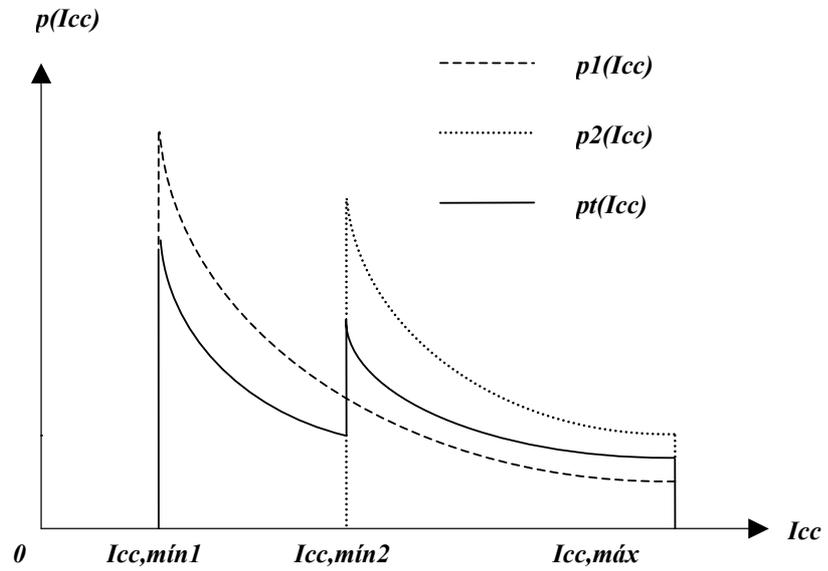


Fig. 3.6 – Densidade de probabilidade da variável aleatória I_{cc} .

Generalizando, para n linhas radiais a densidade de probabilidade total das magnitudes das correntes de curto-circuito é dada por:

$$p(I_{cc}) = \sum_{i=1}^n P(ccL_i) \cdot p_i(I_{cc}) \quad (3.24)$$

onde:

$$\sum_{i=1}^n P(ccL_i) = 1,0 \quad (3.25)$$

3.3. Simulação pelo método de Monte Carlo

Simulação é uma das ferramentas mais poderosas disponíveis para analisar projetos e operação de processos complexos ou sistemas. Simulação sobre modelos que apresentem o maior número possível de características de sistemas reais, permite chegar a resultados precisos num tempo extremamente inferior ao da ocorrência do processo real. Estudar um sistema real por meio de uma representação artificial do processo requer a construção do modelo de simulação que, através de ajustes adequados leva a um resultado esperado [12].

A simulação é um processo de imitar a realidade com modelos que podem conservar ou não as características físicas e lógicas do sistema real. No caso específico da análise de curto-circuito, em que muitas vezes são requeridas soluções numerosas e extremamente laboriosas, recorreu-se aos métodos experimentais. As primeiras simulações utilizavam-se de três métodos: primeiro, usando-se o sistema real; segundo, usando um sistema experimental; e terceiro, um sistema artificial.

O primeiro método, conforme o nome sugere, utilizava-se o próprio sistema para a simulação. Os curtos-circuitos eram provocados em locais estratégicos do sistema, que eram registrados para posteriores análises. Por retratar fielmente os fenômenos a serem analisados, apresentava resultados reais, entretanto, por motivos de dificuldades operacionais o seu uso foi sendo restringido. No sistema experimental a rede elétrica era representada montando-se um sistema em escala reduzida, tentando reproduzir fielmente o sistema real. Porém, alguns fenômenos inerentes às linhas longas e sobretensões eram impossíveis de serem simulados. No sistema artificial os parâmetros do sistema eram representados por resistores, reatores e capacitores (parâmetros concentrados).

Com o aparecimento dos computadores digitais de alta velocidade, o primeiro passo para análise de um sistema de potência passou a ser o desenvolvimento de modelos matemáticos que pudessem descrever as características individuais dos componentes do sistema elétrico, assim como as relações decorrentes de suas interligações.

A simulação que usa o computador, comumente denominado método de Monte Carlo, pode ser classificada em dois tipos:

- a. Simulação de problemas determinísticos;
- b. Simulação de problemas estocásticos e probabilísticos.

A simulação de problemas determinísticos se refere à resolução desses tipos de problemas, tais como integrais, derivadas, equações diferenciais, matrizes, etc., através de modelagem conveniente. A simulação de problemas estocásticos e probabilísticos abrange os casos em que por sua natureza estocástica ou probabilística não podem ser resolvidos através de métodos matemáticos usuais e a simulação é o melhor ou muitas vezes o único método de resolução. Este processo de simulação é feito através de números denominado aleatório ou randômico, os quais podem apresentar as ocorrências aleatórias que caracterizam os problemas a serem resolvidos pelo método de Monte Carlo.

Partindo da premissa de que os números aleatórios devem se comportar segundo a mesma distribuição de probabilidade do fenômeno físico dos eventos aleatórios simulados, a questão é: estes números são realmente aleatórios? A resposta a esta questão é que testes estatísticos são feitos com os números aleatórios gerados de modo a garantir o seu caráter aleatório. Entretanto, seria necessário gerar infinitos números aleatórios por um mesmo processo e submetê-los a um número infinito de testes estatísticos. Nesse sentido, jamais poderíamos ter números aleatórios genuínos, mas números pseudo-aleatórios. Os números pseudo-aleatórios gerados por um computador constituem uma seqüência de números calculados matematicamente por uma regra pré-fixada e são aprovados em testes estatísticos de aleatoriedade porque são gerados em quantidade extremamente grandes, antes de ser iniciada a geração da mesma seqüência [12].

3.4. Variáveis aleatórias

Uma característica importante que exerce grande influência no cálculo das impedâncias seqüenciais, e no aumento da incidência de um determinado tipo de curto-circuito é o padrão da estrutura utilizada na construção do sistema de distribuição. Diante desta constatação, selecionamos um conjunto de padrões e passamos a explorá-los como um dos principais critérios de polarização, no processo de cálculo de curto-circuito probabilístico no sistema de distribuição.

Dentre as principais características que influenciam os valores e o comportamento das correntes de curtos-circuitos em alimentadores de distribuição, são consideradas como as mais importantes, as seguintes:

- Padrões de estruturas de sustentação e disposição dos cabos dos alimentadores, que influenciam nos parâmetros elétricos da rede e conseqüentemente nos valores dos curtos-circuitos;
- Taxa de falha da rede associada ao padrão de estrutura utilizado em cada trecho, devendo-se associá-la à probabilidade de incidência de falta e à avaliação qualitativa da confiabilidade requerida do padrão utilizado;
- Locais da falta, que pode atenuar sensivelmente as correntes de curtos-circuitos, conforme se distancia da fonte;
- Seções dos cabos, que alteram as impedâncias e conseqüentemente reduzem as correntes de curtos-circuitos ao longo dos alimentadores;
- Tipos de curto-circuito que, em função do padrão de estruturas do trecho, aumenta ou diminui a incidência de um determinado tipo de curto-circuito;
- Impedância de falta à terra, que é um parâmetro fortemente aleatório, variando praticamente de zero até um valor máximo característico de cada região, em função principalmente da composição do solo, aterramento dos neutros, etc.

Além das características citadas, também podem ser consideradas às variáveis de acompanhamentos históricos, suas projeções, ou as que melhor permitir modelar o comportamento do sistema de distribuição [4].

3.4.1. Escolha do nó

A localização da falta inicia-se pela escolha de um nó qualquer, que define uma região muito próxima do local da falta, entre o nó e a carga. Esta escolha é baseada em uma distribuição uniforme de probabilidade, cujo valor é o inverso do total de nós do circuito, mostrado na figura 3.7.

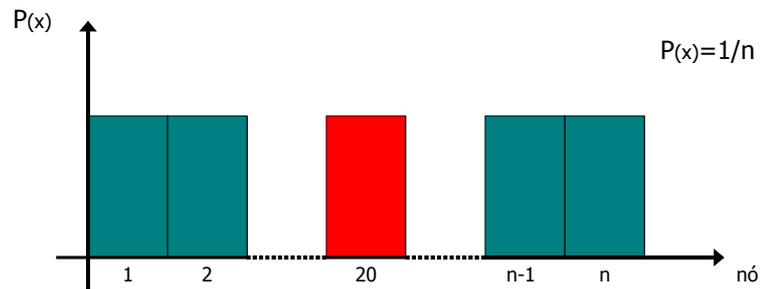


Fig. 3.7 – Distribuição de probabilidade para escolha do nó.

Considera-se que todos os nós criados nos diversos pontos do alimentador são válidos e obedecem a uma numeração contínua de um ao enésimo nó, não necessariamente na ordem da seqüência elétrica, com valores de probabilidade discretos. O barramento da subestação é o nó zero.

Cada nó representa um ponto de interesse no estudo, podendo estar associado a uma mudança de bitola ou tipo de cabo, representação de um equipamento, derivação de um circuito, delimitação de uma região ou um ponto de referência no estudo.

3.4.2. Escolha do local da falta

Conhecendo-se um nó qualquer e o comprimento do ramo a ele relacionado, consideramos que a condição para ocorrer uma falta em qualquer ponto deste ramo está associada à probabilidade de distribuição uniforme, cujo valor é o inverso do próprio comprimento, conforme figura 3.8.

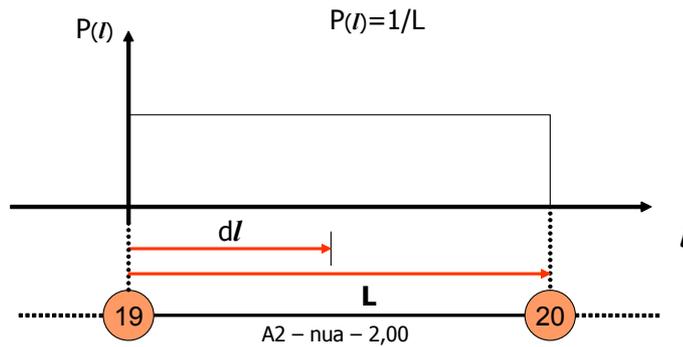


Fig. 3.8 – Distribuição de probabilidade para escolha do local da falha no ramo.

Considerando-se o intervalo de comprimento entre os dois nós e obedecendo a um comprimento de valor crescente a partir do nó fonte, como uma função de probabilidade contínua, calcula-se um ponto no ramo através da equação:

$$dl = L \cdot Rnd \quad (3.26)$$

onde, L é o comprimento do ramo entre o nó fonte e carga e Rnd é um número real aleatório entre zero e um.

Como o barramento da subestação é o nó zero, este pode ser localizado quando um nó carga escolhido tem a fonte neste barramento e a distância percorrida no ramo em direção à carga, a partir da fonte, tem comprimento nulo.

3.4.3. Influência da taxa de falha do ramo

Conhecida a taxa de falha associada ao tipo de rede, para o período em estudo, chamando de taxa de defeito o valor dessa taxa multiplicada pelo comprimento do ramo, representamos a quantidade provável de falha que ocorrerá em um determinado ramo, ficando estabelecida uma relação proporcional aos demais ramos do alimentador.

O gráfico da figura 3.9 representa o valor calculado (aceito) para cada ramo do alimentador. A aceitação ou rejeição de um nó em função do valor da taxa de defeito do ramo será feita da escolha aleatória de um valor entre zero e o maior valor dentre todos ramos do alimentador em estudo. Se este valor escolhido aleatoriamente for menor ou igual ao valor da taxa de defeito do ramo em questão, o nó é aceito e validado, caso contrário, será escolhido novo nó e local da falta.

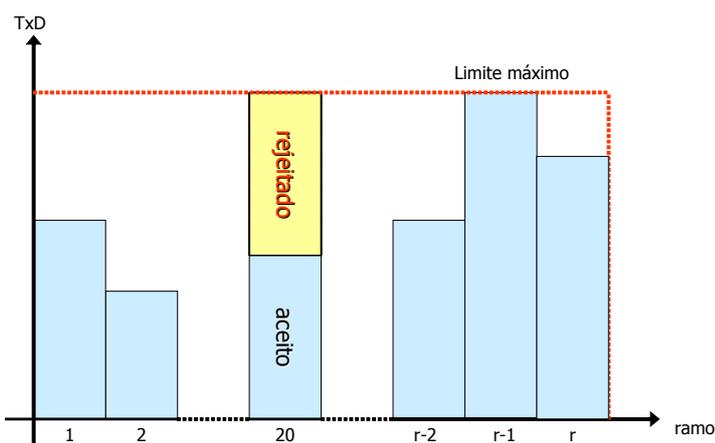


Fig. 3.9 – Taxa de defeito de cada ramo associada ao tipo de rede.

3.4.4 Escolha do tipo de falta

Considerando a facilidade computacional para o cálculo dos valores das correntes de curto-circuito trifásica (I_{cc3f}), entre fases (I_{ccff}) e fase-terra (I_{ccft}), efetuam-se os cálculos dos três valores e escolhe-se um deles aleatoriamente, considerando a proporcionalidade de ocorrência por tipo de curto-circuito do padrão de rede do local da falta.

Para facilitar a escolha do tipo de curto-circuito, criam-se três faixas em uma graduação contínua de zero até 100%, segundo o critério: de zero a um valor A, é a proporção para a corrente de curto-circuito trifásica; de um valor A até B, é o intervalo para curto-circuito fase-fase e acima de B até 100%, é curto-circuito fase-terra. Gera-se um número aleatório entre zero e 1,0 e valida o tipo da corrente de curto-circuito associada a esse número, conforme representado na figura 3.10.

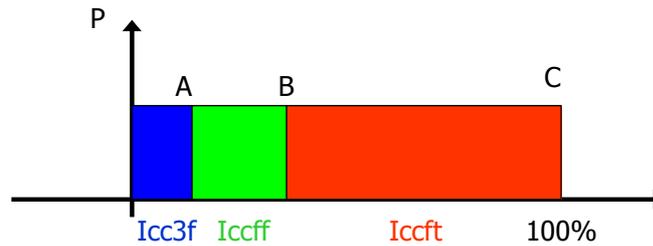


Fig. 3.10 – Proporcionalidade do tipo de curto-circuito para um tipo de rede.

3.4.5. Escolha da resistência de falta a terra

A escolha da resistência de falta a terra é efetuada segundo uma função de distribuição uniforme entre um intervalo pré-determinado.

Tomando-se um intervalo de referência entre valores mínimo e máximo, como representado na figura 3.11, gera-se valores aleatórios entre zero e 1,0, que guardando proporções ao intervalo, determina o valor da provável resistência de falta que será utilizada para o cálculo do curto-circuito fase-terra no ponto em análise.

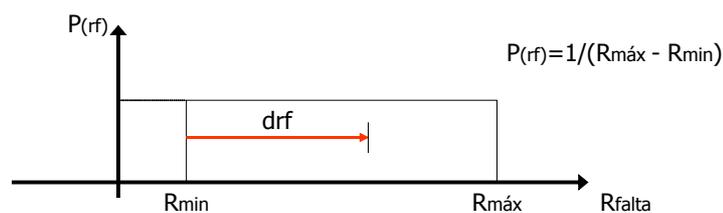


Fig. 3.11 – Função de distribuição uniforme para determinação da resistência de falta à terra.

3.5. Expressões dos curtos-circuitos probabilísticos

Observando-se a expressão $I_{cc}(l, t_{cc}) = f[V, (Z_s | t_{cc}), (Z_l | l, t_{cc})]$, verifica-se que as

correntes de curto-circuito são funções de uma grandeza operacional V_s , normalmente considerada constante, de duas grandezas estruturais Z_s e Z_l e de duas variáveis de natureza aleatória: o local e o tipo da falta. Como consequência, as correntes de curtos-circuitos passam a se comportar também como variáveis aleatórias, o que possibilita avaliá-las sob a ótica probabilística.

A análise de curto-circuito probabilístico em um sistema de distribuição tem como objetivo a obtenção da função densidade de probabilidade de curto-circuito desta corrente. Esta f_{dp} pode ser obtida através dos dois métodos: o analítico e o de Monte Carlo, lembrando que o analítico se baseia na formulação da teoria da probabilidade e o de Monte Carlo se baseia na geração de números pseudo-aleatórios, que permitem definir aleatoriamente o local da falta a partir de uma dada distribuição de probabilidade. A variável aleatória “local” e “tipo da falta” são definidas como lx e t_{cc} respectivamente e para se obter uma f_{dp} com boa precisão exige-se milhares de simulações, proporcionais ao tamanho do sistema ou alimentador.

Identificamos que o método de Monte Carlo apresenta como uma grande vantagem a possibilidade de conformar facilmente as variáveis aleatórias, através de um tipo qualquer de distribuição de probabilidade.

A figura 3.12 mostra o resultado da simulação denominada sem polarização – sp , que não considera a influência da característica do padrão da rede.



Fig. 3.12 – Função de densidade de probabilidade das correntes de curtos-circuitos sem polarização.

Foram simulados curtos-circuitos considerando uma distribuição uniforme na amostragem do local e tipo da falta, com base na expressão (3.27), constatando-se que a fdp das correntes de curto-circuito é função da tensão pré-falta e dos parâmetros elétricos Z_s e Z_l , sendo que Z_l é dependente das variáveis aleatórias lx e t_{cc} .

$$fdp_{sp} = g\{f[V, (Z_s | t_{cc}), (Z_l | lx, t_{cc})]\} \quad (3.27)$$

O ideal seria considerar uma função de distribuição baseada em dados históricos de cada alimentador mas, na falta destes, o local do curto-circuito pode ser encontrado através de algumas características dos padrões de estrutura da rede no local da falta, como a taxa de falha. Podemos dizer neste caso, que os locais dos curtos-circuitos no ramo foram polarizados.

Determinadas características dos alimentadores de distribuição são peculiares. Estas peculiaridades foram incluídas no processamento para a obtenção da fdp , tendo como objetivo tornar os resultados mais próximos da realidade. Neste estudo consideraram-se variáveis aleatórias mais relevantes: o local da falta - lx , a taxa de falha por tipo de padrão da estrutura da rede - txf e a incidência do tipo de curto-circuito - t_{cc} , em função do tipo deste padrão de estrutura - tp , conforme mostra a expressão (3.28). Esta simulação foi denominada com polarização - cp e o resultado pode ser observado na figura 3.13.

$$fdp_{cp} = g\{f[V, (tp | t_{cc}, txf), (Z_s | t_{cc}), (Z_l | lx, tp)]\} \quad (3.28)$$

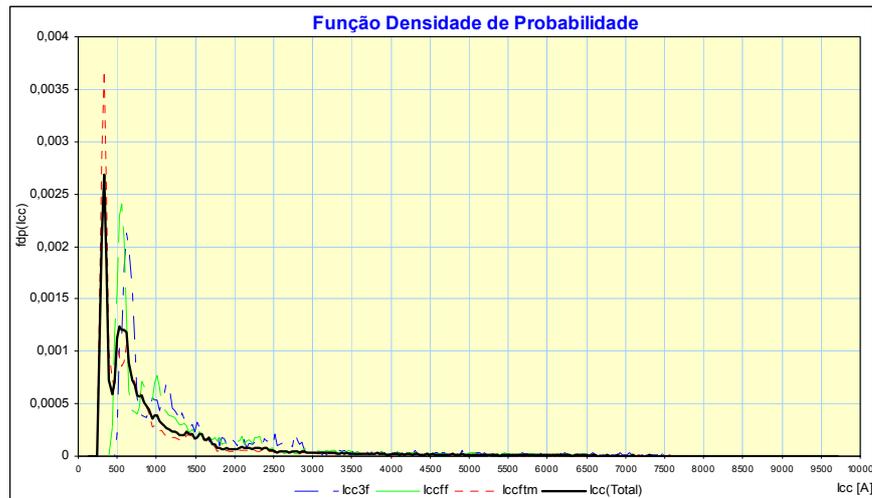


Fig. 3.13 – Função de densidade de probabilidade das correntes de curtos-circuitos com polarização

É possível acrescentar outras variáveis com base em dados históricos de indicadores de qualidade ou criar critérios que levem em considerações características regionais, climáticas, sazonalidade.

3.6. Algoritmo

O módulo de programação do *Excel*[®] da *Microsoft*[®] foi utilizado para o desenvolvimento e testes das rotinas devido à facilidade da programação *Visual Basic*[®], o que facilitou a apresentação dos cálculos e representação gráfica no *Excel*[®]. O inconveniente deste módulo é que não são compiláveis. Isto torna o processamento extremamente moroso por exigir milhões de cálculos repetitivos. A alternativa foi reescrever as rotinas em *Pascal*[®], compilando através do *Delphi*[®], que demonstrou excelente performance e boa representação visual.

A quantidade de amostras, que corresponde ao número de iterações válidas, é definida proporcionalmente ao tamanho do sistema ou alimentador.

Após o desenvolvimento das rotinas de cálculos de curtos-circuitos probabilísticos, foram incluídas as condições de operação do disjuntor, que também determinam a validade ou não da iteração.

O fluxo do processamento é efetuado utilizando-se do seguinte algoritmo:

i – Escolher aleatoriamente um nó do alimentador em estudo;

ii – Escolher aleatoriamente um valor para a taxa de defeito;

iii – Verificar se a taxa de defeito é aceita para o ramo do nó escolhido: se for rejeitado volte ao passo i, se aceito escolher aleatoriamente o local no ramo;

iv – Escolher aleatoriamente o valor da impedância de falta à terra;

v – Calcular os valores dos curtos-circuitos: trifásico, bifásico e fase-terra com a impedância de falta;

vi – Escolher aleatoriamente um dos tipos de curtos-circuitos;

vii – Verificar se o disjuntor opera para a corrente de curto-circuito escolhida: se não operar volte ao passo i, se operar acumular a ocorrência;

viii – Voltar ao passo i até que a quantidade de amostra pré-definida seja atingida.

Capítulo 4

TESTES E RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é apresentar a descrição das rotinas utilizadas para a aplicação em um alimentador de distribuição real, os resultados dos cálculos para este alimentador, bem como analisar os parâmetros empregados na metodologia. Os dados do alimentador estão no Apêndice C, que apresenta o diagrama unifilar, os dados da barra da subestação, as características do disjuntor, os valores das impedâncias de seqüência, o comprimento e o tipo do padrão da rede de cada ramo do alimentador.

4.1. Desenvolvimento de rotinas de cálculos

A metodologia desenvolvida neste trabalho utiliza-se das características físicas dos padrões de redes de distribuição, item 2.2, da taxa de falha para o padrão de rede, item 2.5, da contribuição por tipo de falta do padrão de rede, item 2.6, da aleatoriedade do valor da impedância de falta a terra, item 3.4.5 e do cálculo de curto-circuito adaptado para os sistemas de distribuição de energia elétrica, item 3.6.

Tomando como caso base os dados do alimentador do apêndice C, foram desenvolvidas as seguintes rotinas de cálculos:

- 1) Rotina para executar a leitura do arquivo de dados necessários para a simulação, armazenar os valores lidos em variáveis e matrizes apropriadas; calcular os valores das impedâncias

de seqüência dos ramos bem como seus valores acumulados da barra da subestação até cada um dos nós existentes.

2) Rotina para efetuar os cálculos de curto-circuito trifásico, fase-fase, fase-terra e fase-terra com um valor de impedância de falta à terra escolhida.

3) Rotina para executar o algoritmo da metodologia desenvolvida especificamente para o cálculo de curto-circuito probabilístico em alimentadores de distribuição, definido no item 3.6, verificar o limite de corrente de operação do disjuntor frente às restrições impostas e gerar as matrizes com as frequências de ocorrências de curto-circuito.

4) Rotina para executar o tratamento estatístico nos dados de saída da rotina anterior, definir a função densidade de probabilidade (*f_{dp}*) das correntes de curto-circuito e sua densidade acumulada de probabilidade (*d_{ap}*).

5) Rotina que monta a equação de operação do disjuntor, determina o intervalo de sua manutenção para a corrente de curto-circuito mais apropriada à densidade acumulada de probabilidade, ajustando a determinados intervalos de confiança.

As demais rotinas desenvolvidas são auxiliares para formatação e apresentação dos dados de saída ou formatação específica para apresentação gráfica.

4.2. Determinação da amostra

A simulação pelo método de Monte Carlo exige uma grande quantidade de cálculos de curto-circuito, que precisam ser avaliados convenientemente para não inviabilizar o tempo de resposta no processamento e veracidade dos cálculos.

Dentre as alternativas testadas, mostrou-se mais adequado do ponto de vista prático, o critério de amostrar por uma proporção aos quilômetros de rede primária do alimentador. O critério consiste em determinar um fator que multiplicado pelos quilômetros de rede, será o número de

amostras válidas para o alimentador. Na verdade, a quantidade de curtos-circuitos amostrados na simulação, incluindo as amostras rejeitadas é bem superior, numa relação inferior a 30% das amostras válidas para o total simulado em cada processamento. Esta relação varia significativamente em função das alterações dos parâmetros, com a limitação de corrente para o disjuntor.

Utilizando-se os dados do alimentador de base, que possui 69,93 km de rede primária, efetuamos simulações para 1.000, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 e 30.000 amostras válidas por quilômetro de rede. A fim de verificarmos um ponto a partir do qual haveria estabilidade dos valores de correntes de curto-circuito, organizamos a saída de dados pelos intervalos de confiança entre 90 e 100%.

Tomando como referência a coluna para 30.000 amostragens por quilômetro de rede, comparando com as correntes de curto-circuito das demais colunas, sublinhamos as diferentes e observamos que há uma convergência a partir de 20.000 amostras para os respectivos intervalos de confiança, ou seja, aumentando-se o número de amostras por quilômetro de rede o resultado dos cálculos permaneceram inalterados, como mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Valor da corrente de curto-circuito na simulação variando o número de amostras.

Interv. Conf.	Quantidade de amostras por quilômetro de rede						
	1.000	5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000
	Valor da corrente de curto-circuito em ampères						
100%	9.710	9.710	9.710	9.710	9.710	9.710	9.710
99%	6.318	6.382	6.350	6.350	6.382	6.382	6.382
98%	5.454	5.486	5.486	5.486	5.486	5.486	5.486
97%	4.750	4.814	4.814	4.814	4.814	4.814	4.814
96%	4.238	4.270	4.302	4.302	4.302	4.302	4.302
95%	3.822	3.854	3.854	3.854	3.854	3.854	3.854
94%	3.502	3.534	3.534	3.534	3.502	3.502	3.502
93%	3.214	3.246	3.246	3.246	3.246	3.246	3.246
92%	3.022	3.022	3.022	3.022	3.022	3.022	3.022
91%	2.830	2.830	2.830	2.830	2.830	2.830	2.830
90%	2.702	2.702	2.702	2.702	2.702	2.702	2.702

A escolha deste referencial, podemos dizer que foi acertada, principalmente quando notamos que pode ser aplicado a qualquer alimentador. Isto nos levou a intensificar os testes e concluir que amostra por quilômetro de rede é a que melhor nos atende. Faltava-nos a avaliação do tempo consumido para realização dos cálculos.

Efetuada a medição do tempo de processamento considerando a utilização do módulo de programação em *Visual Basic Excel*[®], em um microcomputador com processador *X86 Family 6 Model 8 Stepping 1 Authentic AMD*[®] 1533 MHz, memória física total de 256 MB com sistema operacional *Microsoft Windows XP Professional*[®], que apresentamos na figura 4.1.

Pela figura 4.1 podemos observar que para um processamento com 25.000 amostras por quilômetro de rede, no alimentador com 69,93 km, foram necessárias 6.076.992 amostras para validar 1.748.250 amostras ($69,93 \times 25.000$) e, gasto um tempo de 59 segundos para o processamento.

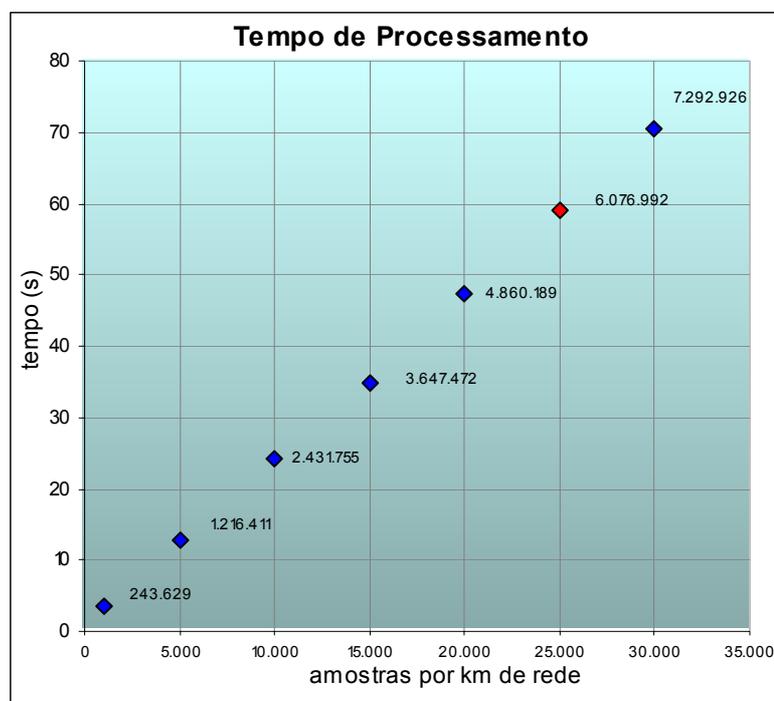


Fig. 4.1 - Tempo de processamento em função do número de amostra por quilômetro de rede. O valor indicado ao lado de cada ponto é o total de amostras aceitas, mas rejeitadas.

O processamento de 25.000 amostras por quilômetro de rede foi o valor mais apropriado para estabilizar a curva da densidade acumulada de probabilidade de curto-circuito deste alimentador, para um intervalo de confiança entre 90% e 100%.

4.3. Determinação da quantidade de classes

A determinação do número de classes do histograma é um pré-requisito importantíssimo na geração da função densidade de probabilidade, uma vez que um número muito pequeno ou muito grande pode prejudicar a interpretação do fenômeno em estudo.

Pode-se observar na literatura sobre este assunto que não há uma regra geral a ser aplicada na determinação do número de classes, podendo haver divergências de interpretação a partir de valores diferentes para os pontos de início, término, mínimo, médio e máximo da função gerada.

As seguintes regras clássicas para determinação do número de classes foram testadas, mas não obtivemos resultado satisfatório:

- a) Na classificação dos dados é normal usar 10 a 20 classes [14];
- b) Se o número de observações for >25 , o número de classes é determinado por $k = \sqrt{n}$, onde n é o número de amostras [15] e,
- c) Regra de Sturges: o número de classes é obtido por $k=1+3,22 \log n$.

A função densidade de probabilidade é contínua entre um intervalo de valor mínimo e máximo de curto-circuito. Foi calculada através da introdução de variáveis aleatória adequada ao comportamento da rede para os diversos tipos de padrão de estrutura. A necessidade de grande quantidade de amostra para a representação fiel do alimentador levou-nos a fazer um estudo mais detalhado do comportamento da *fdp* em relação ao número de classes necessárias, o que representasse mais adequadamente a função no intervalo de corrente de curto-circuito de um alimentador.

A definição utilizada foi empírica considerando como único critério, o de efetuar várias simulações e assim observar, através do gráfico da figura 4.2, a quantidade de classes necessárias para que a função pudesse ter um comportamento mais estável. Esta estabilidade foi considera

satisfatória por comparação do alisamento das curvas e pela proximidade da passagem do valor de máxima probabilidade da função.

Pela análise das curvas na figura 4.2, pode-se notar que utilizar 100 ou 500 classes, gera-se pontos de distorções nos valores máximos de probabilidades e ainda, que na de 100 classes houve uma grande deformidade em vários pontos da curva. As curvas de 200, 300 e 400 classes foram bem comportadas. Escolhemos trabalhar com a curva de 300 classes que representou o comportamento mais estável e mediano, podemos até dizer, numa análise mais apurada, ser esta um ponto de transição entre as classes 200 e 400.

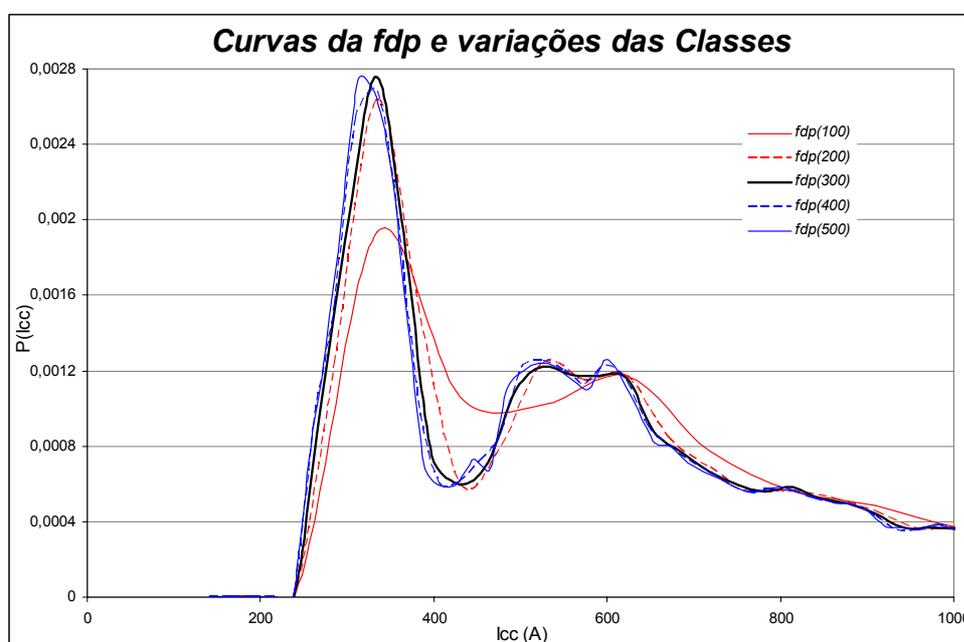


Fig. 4.2 - Comportamento da função densidade de probabilidade com a variação da quantidade de classes do histograma.

O intervalo dos valores de curtos-circuitos nos alimentadores de distribuição inicia na sua maioria de alguns poucos ampères, para as falhas com alta impedância de falta, a um valor máximo em torno de 15,0 kA. Para este intervalo, a formação da f_{dp} com curvas a partir de 300 classes mostrou-se satisfatória para estudos de previsão da manutenção de disjuntores.

4.4. Cálculo do intervalo de confiança e nível de significância

O intervalo de confiança das correntes de curtos-circuitos é calculado através da curva da densidade acumulada de probabilidade – dap , que deverá ser obtida através da expressão:

$$dap = \int_{Icc_mín}^{Icc_máx} fdp(Icc) \cdot dIcc \quad (4.1)$$

onde:

fdp – função densidade de probabilidade da corrente de curto-circuito;

Icc – corrente de curto-circuito e,

$Icc_mín$ e $máx$ – definem o intervalo da função (domínio).

O cálculo da densidade acumulada de probabilidade das correntes de curtos-circuitos de um alimentador efetuado através da equação (4.1), resultará em valores correspondentes ao intervalo de confiança.

A representação gráfica da expressão (4.1), mostrada na figura 4.3, contempla todos os intervalos de confiança e no destaque, o intervalo equivalente aos valores de 90 a 100%. Observa-se que 98%, de todos os possíveis curtos-circuitos, que deverão ocorrer neste alimentador, serão de valor inferior 5.000,0 A, enquanto que o valor da corrente máxima de curto-circuito simétrica é de 9.710,0 A.

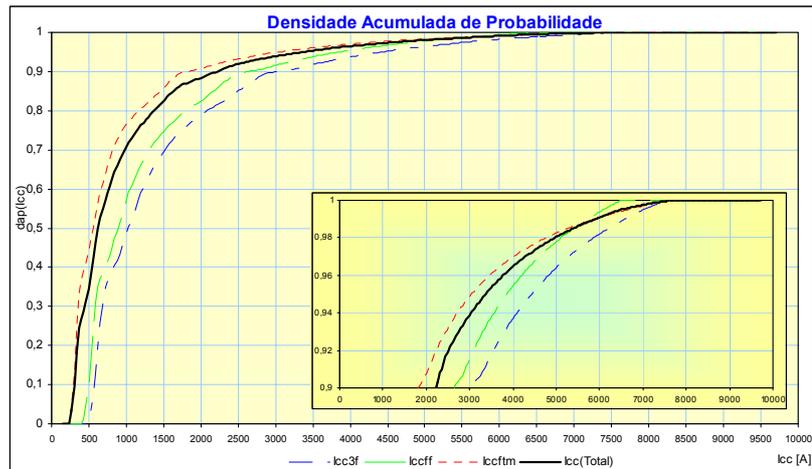


Fig. 4.3 - Curva da densidade acumulada de probabilidade dos curtos-circuitos.

De uma forma muito simples, definiríamos o nível de significância (2%) como sendo o complemento do intervalo de confiança (98%). Na observação acima, equivaleria dizer que estaríamos cometendo um erro de 2% ao afirmar que não haverá curtos-circuitos com valores de 5.000,0 a 9.710,0 A. Notar que em percentual a redução da corrente de curto-circuito é de 48,5%, para um assumir um erro de até 2%.

As definições clássicas de intervalo de confiança e nível de significância são encontradas no item B.2 do apêndice.

4.5. Número de operações para manutenção

O intervalo de manutenção do disjuntor é calculado utilizando-se a curva do número de operações (manobras) em curto-circuito, fornecida pelo fabricante (um exemplo de curvar é mostrado na figura 2.11) e o valor do curto-circuito característico do alimentador.

Uma característica peculiar da curva de operação do disjuntor é a presença de dois pontos notáveis que são:

- 1) Abaixo do valor da corrente nominal do disjuntor, a curva passa a ter um valor constante do número de operações, que corresponde ao limite máximo de operações de manobras, para o qual deverá obrigatoriamente passar por uma manutenção preventiva;
- 2) Acima da capacidade de interrupção há a necessidade de se fazer uma intervenção a cada operação em curto-circuito, o que também deve ser entendido que o disjuntor não apresenta os requisitos técnicos para permanecer instalado no local.

Considerando-se o intervalo de confiança dos cálculos das correntes de curto-circuito total, que leva em consideração os curtos-circuitos do tipo trifásico, fase-fase e fase-terra, ou nível de significância, este, representando um provável erro no valor dessas correntes, é determinado o número de operações em curto-circuito para manutenção do disjuntor do alimentador.

Reproduzido a curva de operação do disjuntor 3AH5, na figura 4.4, para os valores de 0, 1, 2, 5 e 10% de nível de significância, com os seus respectivos intervalos de operações para manutenção. Para cada um dos níveis de significância foi verificado o valor da corrente de curto-circuito, extraído da figura 4.3 e localizado o número de operações correspondente na curva de operações em curto-circuito para manutenção do disjuntor, na figura 4.4.

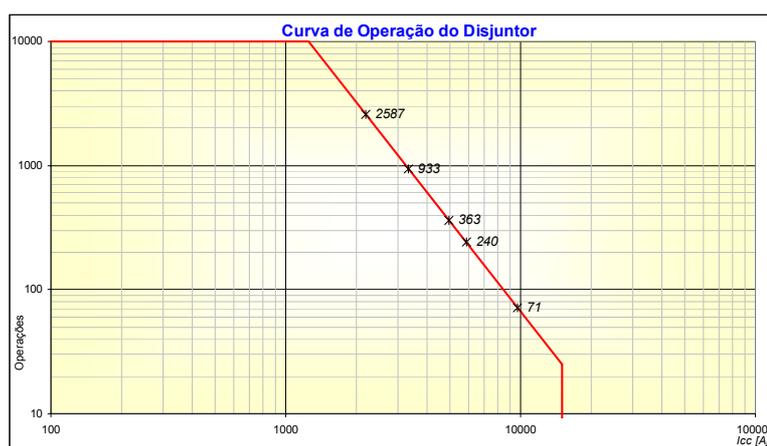


Fig. 4.4 - Curva de operações em curto-circuito para manutenção do disjuntor 3AH5 da Siemens®.

A figura 4.5 apresenta, de forma simplificada, os valores das correntes de curto-circuito e os respectivos valores do intervalo de manutenção do disjuntor no alimentador do caso base, para os níveis de significância de 0 a 10%.

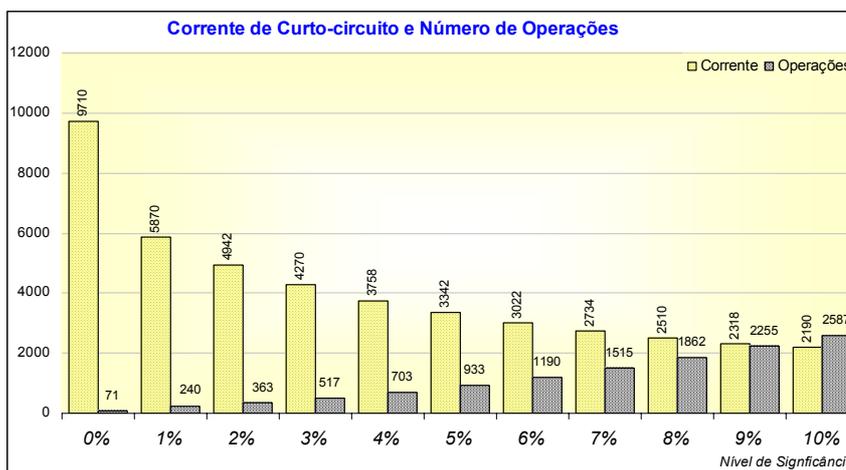


Fig. 4.5 – Gráfico da corrente de curto-circuito e número de operação para manutenção por nível de significância.

4.6. A redução na manutenção dos disjuntores

A análise apenas da corrente de curto-circuito probabilística e do número de operações para manutenção do disjuntor nos mostra que há vantagens significativas abandonar a premissa de utilizar-se a máxima corrente, mas também gera dúvidas quanto ao valor a adotar.

Como o objetivo final desta análise é não comprometer técnica e economicamente o desempenho do alimentador, o risco da aplicação dessa metodologia é muito baixo para a redução da manutenção proporcionada.

A figura 4.6 facilita a tomada de decisão através da combinação de três fatores a considerar na escolha do intervalo de manutenção do disjuntor, que são:

1. Nível de significância;

2. Valor de curto-circuito em relação ao valor máximo;
3. Redução dos custos de manutenção.

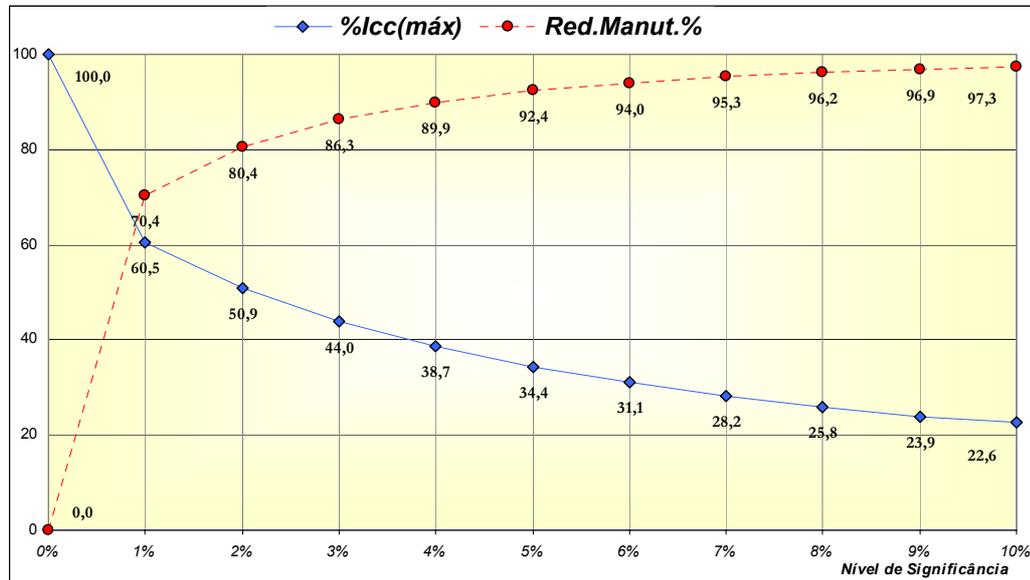


Fig. 4.6 – Gráfico comparativo entre o percentual da corrente máxima e redução da manutenção no disjuntor.

Uma postura, ainda que conservadora, é adotar um nível de significância de até 2%, o que nos leva a trabalhar com uma corrente de curto-circuito de 4.942,0 A (50,9% da corrente máxima), com uma redução de até 80,4% no custo da manutenção.

Para alimentadores com aplicação de novas tecnologias nos ramos iniciais, há que se considerar, que a maioria delas reduzem significativamente a probabilidade de ocorrência de curto-circuito próximo ao disjuntor, esta redução será um fator preponderante na escolha do novo valor de curto-circuito a ser adotado para definição do número de operações para manutenção do disjuntor.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1. Cálculo de curto-circuito probabilístico

O método e as rotinas aqui desenvolvidas para cálculos de curto-circuito probabilísticos em rede de distribuição, possui facilidades que permitem modelar o comportamento das correntes nos alimentadores. O estudo de caso através de simulação em um sistema real mostra que a polarização pelo tipo de estruturas é um refinamento valioso para caracterizar o perfil das correntes.

Dois critérios para definição de parâmetros de cálculos se mostraram satisfatórios. Um deles corresponde à determinação do tamanho da amostra, definida utilizando uma proporção aos quilômetros de rede. O outro envolve a determinação da quantidade de classes, definida através de simulações pelas quais concluiu-se que o valor 300 é uma referência ideal, considerando que para os alimentadores de média tensão o valor da corrente de curto-circuito máxima é cerca de 15,0 kA.

Considerar a resistência de falta como um valor constante é uma premissa não confortável nos estudos de curto-circuito e não reflete o comportamento real. Assim sendo, a resistência de falta foi considerada como uma variável aleatória dentro de intervalo pré-definido, consagrado pelo uso pelas empresas concessionárias de energia elétrica.

Observa-se que é significativa a atenuação dos valores dos curtos-circuitos nos alimentadores à medida que se distância da subestação. Este fato contribui significativamente para a redução da probabilidade de ocorrer o valor máximo de curto-circuito.

5.2. Determinação do intervalo da manutenção do disjuntor

A utilização dos conceitos de intervalo de confiança para determinar que valor de corrente de curto-circuito e o nível de significância, para avaliar o risco provável de erro no valor adotado, mostraram-se como os referenciais mais adequados para determinação do intervalo de manutenção do disjuntor.

Considerando a quantidade de disjuntores de alimentadores de distribuição existente e a facilidade de aplicação desta metodologia, pode-se imaginar quanto é significativa o impacto na redução de custo da manutenção.

Em instalações nas quais o disjuntor tem a capacidade de interrupção adequada, mesmo que ocorram correntes de curto-circuito de valores superiores ao utilizado para determinação do intervalo de manutenção, não haverá comprometimento dessa metodologia, pois esses valores serão compensados, com grande margem de certeza, por curto-circuito de valores inferiores.

Uma das alternativas a ser avaliada para a redução mais significativa da manutenção dos disjuntores por curto-circuito, bem como, do aumento do índice da confiabilidade do alimentador, é a redução da probabilidade de ocorrência de faltas de valores elevados, com a aplicação de estruturas de padrões de construção mais apropriadas, próximas à subestação.

5.3. Trabalhos apresentados em congressos e seminários

Durante o desenvolvimento desta metodologia foram elaborados os seguintes trabalhos:

Utilização do Método Probabilístico para Planejamento da Manutenção de Disjuntores em Sistemas de Subtransmissão e de Distribuição

II SisPot 2002 – Encontro de Pesquisadores em Sistema de Potência - FEEC
Apresentado em Campinas, 26 de Março de 2002.

Aplicação de um Método Probabilístico para Planejamento da Manutenção de Disjuntores em Sistema de Distribuição

XIV CBA 2002 - Congresso Brasileiro de Automática
Apresentado em Natal-RN, 5 de Setembro de 2002.

Probabilistic Method to Schedule the Circuit Breakers Maintenance in Distribution System

10th International Symposium - SCC' Short-circuit Currents in Power System – 2002
Publicado em Lodz (Polônia), 29 de Outubro de 2002.

Modelo de Cálculo de Curto-circuito Probabilístico para Sistema de Distribuição Radial através do Método de Simulação de Monte Carlo

III SisPot 2003 – Encontro de Pesquisadores em Sistema de Potência - FEEC
Apresentado em Campinas, 15 de Abril de 2003.

Aplicação de um Método Probabilístico na Programação da Manutenção de Disjuntores, Considerando o Efeito das Características Físicas dos Padrões de Redes de Distribuição

III SNCA 2003 - Seminário Nacional de Controle e Automação
Apresentado em Salvador-BA, 13 de Junho de 2003.

5.4. Sugestões para trabalhos futuros

Utilizando-se da metodologia apresentada para cálculo de curto-circuito probabilísticos em alimentadores de distribuição, vislumbramos o desenvolvimento de pesquisas e trabalhos abordando as seguintes aplicações:

- Melhor definição da região e da escolha do tipo de padrão de estrutura a ser aplicado nas redes de distribuição visando a redução das interrupções por falhas;
- Alocação otimizada de equipamentos de proteção em alimentadores de distribuição;
- Especificação de equipamentos de proteção e manobra com base na capacidade de interrupção, admitindo um risco calculado em função da probabilidade ocorrência de faltas;
- Otimização da coordenação do sistema de proteção da rede de distribuição;
- Previsão de pontos críticos e de atenção no sistema de distribuição, com a identificação dos valores de curto-circuito mais prováveis em cada região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Resolução número 024, **Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras** – ANEEL - 27 de janeiro de 2000.
- [2] Kindermann, Geraldo, **Curto-circuito**, 2ª. Edição – Porto Alegre – Sagra Luzzatto, 1997.
- [3] Mamede, Juracy P., Sato, Fujio, **Probabilistic Method to Schedule the Circuit Breakers Maintenance in Distribution System**, SCC' 10th International Symposium Short-circuit Currents in Power Systems, Lodz – Poland – October 28-29, 2002.
- [4] Mamede, Juracy P., Sato, Fujio, **Aplicação de um método probabilístico na programação da manutenção de disjuntores, considerando o efeito das características físicas dos padrões de redes de distribuição**, III Seminário Nacional de Controle e Automação – Salvador BA – 25 de junho de 2003.
- [5] Silva, José Francisco Resende da, **Cruzetas para redes de distribuição de energia elétrica à base de polipropileno** – Dissertação de Mestrado – Orientador: Altafim, Ruy Alberto Corrêa - São Carlos – Universidade de São Paulo, 2003.
- [6] Sato, Fujio, **Análise de curto-circuito em sistemas elétricos de potência** – Dissertação de Mestrado – Orientador: Monticelli, Alcir José – Campinas – Universidade Estadual de Campinas, 1979.
- [7] Nunes, Renato de A. F., Coutinho, I. P., **Curto-circuito Probabilístico: Técnicas e Aplicações**, III Seminário Técnico de Proteção e Controle – Rio de Janeiro – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Abril de 1991.
- [8] NBR 5462 - **Confiabilidade e manutenibilidade** – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NOV-1994.
- [9] Mamede Filho, João, **Manual de equipamentos elétricos**, volume 1 – Rio de Janeiro – LTC Livros Técnicos e Científicos Editora, 1993.
- [10] Alves, Edson, **Manutenção de Subestações de Distribuição de Energia Elétrica: Uma Visão Crítica e Atual** – Dissertação de Mestrado – Orientador: Grimoni, José Aquiles Baesso - São Paulo – Universidade de São Paulo, 2003 .

- [11] Mamede, J. Pereira, Sato, Fujio, **Aplicação de um Método Probabilístico para Planejamento da Manutenção de Disjuntores em Sistemas de Distribuição**, XIV Congresso Brasileiro de Automática – Natal RN – 2 a 5 de setembro de 2002.
- [12] Sato, Fujio, **Um estudo comparativo da análise de curto-circuito probabilístico utilizando ambiente paralelo e distribuído** – Tese de Doutorado – Orientador: Monticelli, Alcir José – Campinas – Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- [13] Freund, J. E., **Mathematical statistics**, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1971.
- [14] Hoel, Paul G. , **Estatística Matemática** – tradução Bravo, Othon Guilherme P., Rio de Janeiro – Editora Guanabara Dois, 4^a. Edição.
- [15] Lopes, Lúcia Bahia, **Distribuição de Frequência – Conceitos Fundamentais** – Notas de Aulas do Departamento de Estatística – www.iesam.com.br/03/iee/doc/aula2.pdf – Manaus - Instituto de Estudos Superiores da Amazônia.
- [16] Naylor, T. H., Balintfy, J. L., Burdick, D. S. E Chu, K., **Técnica de Simulação em Computadores** – tradução Teixeira, E. E., São Paulo – Editora da Universidade de São Paulo, 1971.
- [17] Shimakura, Silvia Emiko, **Estatística II** – Notas de Aulas do Departamento de Estatística – www.est.ufpr.br/~silvia/CE003 – Curitiba - Universidade Federal do Paraná – 2003.
- [18] Stevenson, Willian J., **Estatística Aplicada à Administração** – tradução: Farias, Alfredo Alves de - São Paulo – Harper & Row do Brasil – 1981.

Apêndice A

Efeito do arco elétrico na operação do disjuntor

A.1. O arco elétrico

O arco elétrico é um fenômeno que ocorre quando se separam dois terminais de um circuito que conduz determinada corrente de carga, sobrecarga ou de defeito. Pode ser definido também como um canal condutor, formado num meio fortemente ionizado, provocando um intenso brilho e elevando, consideravelmente, a temperatura do meio em que se desenvolve.

Durante a operação de abertura de um disjuntor, inicialmente o pólo apresenta os contatos fechados por onde circula determinada corrente elétrica. Quando fechado o disjuntor, a resistência elétrica é formada basicamente pela pressão dos contatos metálicos, resultando numa pequena perda por efeito Joule. No instante inicial do movimento do contato móvel, a pressão entre os contatos diminui, aumentando a resistência elétrica entre eles e forçando a corrente a circular apenas pelas saliências existentes nas superfícies dos contatos, de tamanho microscópico e normais a qualquer metal, mesmo que seja dispensado um esmerado tratamento no acabamento das superfícies. Isso

acarreta grandes perdas ôhmicas, elevando consideravelmente a temperatura das superfícies condutoras.

Imediatamente após a separação dos contatos, a corrente continua passando através do meio fortemente ionizado. Com o afastamento total dos contatos, observa-se a formação do arco que precisa ser extinto o mais rapidamente possível, de sorte a evitar a fusão dos contatos.

No fechamento do disjuntor, a pressão da mola causa deformação elástica e plástica dos contatos. Como consequência da deformação elástica há um processo de ricocheteamento dos contatos que pode repetir várias vezes e somente cessa quando toda a energia cinética do mecanismo do contato móvel transforma-se em calor. Como as superfícies dos contatos apresentam temperatura extremamente elevada, inicia o processo denominado emissão térmica. Neste processo, cada átomo do metal de que são constituídos os contatos recebe uma elevada quantidade de energia, fazendo com que os elétrons que estão em órbita em torno do núcleo sejam atirados para as camadas posteriores, afastando-se do núcleo, até serem liberados para fora de sua influência.

É nesse meio fortemente ionizado, contendo elétrons arrancados do catodo e os íons resultantes do meio existente, que a corrente elétrica continua a ser conduzida entre os terminais abertos. É importante observar que a corrente de arco é constituída por dois conjuntos de elétrons, os originados no processo de ionização, que se deslocam do catodo no sentido do anodo e os que constituem a corrente elétrica propriamente dita, que muda de sentido a cada meio ciclo.

Para que cesse a condução de corrente elétrica no meio ionizado, é necessário que esse meio sofra um processo de desionização. Isto pode ser feito substituindo-se o meio ionizado por um meio não ionizado. Ao mesmo tempo em que o meio extintor é substituído por outro, processa-se o resfriamento na zona do arco, o que contribui significativamente para a desionização da região dos contatos.

A corrente é conduzida através da resistência ôhmica do arco elétrico, provoca queda de tensão entre os contatos. Como a resistência do arco varia com a temperatura, a queda de tensão também varia, e de maneira significativa, já que o arco pode atingir de 4.000 °K na sua periferia a até 15.000 °K no seu núcleo [9].

A.2. Princípio de interrupção da corrente elétrica

A interrupção da corrente elétrica em qualquer dispositivo interruptor faz-se separando seus respectivos contatos, que permitem, quando fechados, a continuidade elétrica do circuito. Durante a separação, a variação da energia armazenada no circuito, provoca o surgimento do arco elétrico, que precisa ser prontamente eliminado sob pena de provocar conseqüências danosas ao equipamento.

O arco formado torna-se o meio de continuidade do circuito, até que a corrente se anule, durante o ciclo senoidal. Nesse momento, se dá a interrupção da chave. Porém, se o meio no qual se dá a abertura dos contatos permanecer ionizado durante o meio ciclo seguinte, a corrente poderá ter a continuidade elétrica restabelecida com a formação de um novo arco.

Como o princípio básico, para a extinção de um arco elétrico qualquer é necessário provocar o seu alongamento por meios artificiais, reduzir sua temperatura e substituir o meio ionizado entre os contatos por um meio isolante eficiente que pode ser o ar, o óleo ou o gás, o que permite classificar o tipo do meio extintor e conseqüentemente, as características construtivas dos disjuntores.

Ainda, se durante a interrupção de uma corrente elétrica ela é reduzida abruptamente a zero, surgem sobretensões no circuito, capazes de provocar danos ao equipamento e aos aparelhos de consumidores conectados no alimentador.

A.3. Abertura de cargas indutivas

Na abertura dos contatos do disjuntor, há certa instabilidade do arco quando a corrente, ao ser interrompida, se aproxima do seu zero natural, ocorrendo o corte prematuro, o que resulta em sobretensões em todo o sistema. Assim, quando o disjuntor abre os seus contatos, há uma

transferência de energia do circuito indutivo para as capacitâncias naturais do sistema. Porém, nem toda energia do circuito magnético é integralmente transferida para as capacitâncias.

O corte prematuro da corrente pelo disjuntor é conhecido como *corrente de corte* ou de *chopping*, é característica mais evidente nos disjuntores a SF₆. Pode ocorrer com menor frequência nos demais equipamentos, porque esses disjuntores são normalmente construídos para uma elevada capacidade de ruptura, próprios para operar sob correntes de curto-circuito de valor muito alto. Porém, quando são solicitados a operar em corrente de pequeno valor, seu mecanismo de abertura apresenta sobre capacidade de interrupção, que acelera a extinção do arco antes da passagem da corrente pelo seu zero natural, acarretando sobretensões. O *chopping* é o valor instantâneo da corrente senoidal, a partir do qual o disjuntor extingue instantaneamente.

A determinação da corrente de *chopping* é difícil, devido à incerteza de se estabelecer certos parâmetros do circuito necessários para os cálculos, como os valores das capacitâncias da unidade de interrupção e da própria carga, além de outras características técnicas não reveladas pelos fabricantes dos disjuntores.

A.4. Abertura em regime de curto-circuito nos terminais do disjuntor

Na análise de interrupção de uma corrente de curto-circuito trifásica pelo disjuntor, deve-se levar em consideração que três correntes de defeito estão defasadas entre si de 120°, enquanto a passagem pelo zero natural se dá a cada 60° por qualquer uma das três correntes do sistema.

Considerando que os três contatos do disjuntor se separam, nas três fases, praticamente no mesmo instante, pode-se perceber facilmente que a interrupção nos três pólos ocorre em tempos diferentes. Isto é, se num determinado instante um pólo interrompe a corrente que está passando pelo seu zero natural, nos outros dois pólos a corrente de defeito continua circulando.

A.5. Abertura em regime de curto-circuito a curta distância dos terminais do disjuntor

Quando ocorre um curto-circuito a uma determinada distância do disjuntor, que pode variar de algumas centenas de metros a poucos quilômetros, dependendo da topologia e parâmetros da rede, o sistema sofre solicitações severas de alta frequência, num fenômeno conhecido como *curto-circuito quilométrico*.

A severidade à qual fica submetido o disjuntor nestas condições, não depende apenas do valor da corrente de defeito, mas também da tensão transitória de restabelecimento que surge entre os seus contatos. Nesses casos, é necessário que o meio de extinção de arco apresente uma rigidez dielétrica elevada, caso contrário, o disjuntor será seriamente danificado.

A.6. Abertura em regime de curto-circuito distante dos terminais do disjuntor

Neste caso, há uma intensa transferência de energia armazenada entre a capacitância e indutância do sistema desenergizado.

Considere-se o sistema com uma fonte de tensão alimentando uma linha de distribuição longa, que pode ser representada por circuito π , a parâmetros concentrados, com resistências, capacitância e indutâncias do lado carga. O disjuntor abre o circuito quando o arco é extinto e a corrente passa pelo zero natural. Por tratar-se de um curto-circuito, a tensão está adiantada da corrente num ângulo próximo a 90° ; portanto, assumindo o seu valor máximo. Assim, no instante da interrupção da corrente, as capacitâncias do lado carga, estão plenamente carregadas em virtude da posição da tensão no seu valor máximo. Efetuada a interrupção pelo disjuntor, as capacitâncias da carga, eletricamente separada do circuito fonte, transfere a sua energia armazenada para as indutâncias da carga, que imediatamente transfere a mesma energia de volta às capacitâncias, agindo como um circuito oscilante. A transferência de energia é amortecida pelas resistências da linha de distribuição, reduzindo o intervalo de tempo do regime transitório quanto maiores forem essas resistências.

Apêndice B

Probabilidade

B.1. Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo propiciou a solução de problemas matemáticos não probabilísticos por simulação de um processo estocástico, que tem momentos ou distribuições de probabilidade satisfazendo às relações matemáticas do problema não determinístico [16].

Dois diferentes tipos de problemas dão margem ao uso desta técnica:

1) Os problemas que envolvem alguma forma de processo estocástico. A demanda de consumidores, o tempo de produção e o investimento total de uma organização são exemplos de variáveis econômicas que podem ser consideradas de natureza estocástica. Os métodos de Monte Carlo foram desenvolvidos não só para simular a maioria das bem conhecidas distribuições de probabilidades como para o caso das distribuições empíricas.

2) Certos problemas matemáticos completamente determinísticos não podem ser facilmente resolvidos (se solução houver) por métodos estritamente determinísticos. Entretanto é possível obter soluções aproximadas para esses problemas simulando um processo estocástico cujos momentos, funções de densidade ou funções de distribuição cumulativas, satisfaçam as relações funcionais ou

requisitos de solução de problemas determinísticos. Soluções de equações diferenciais de ordem superior (acima de segunda ordem), problemas de integrais múltiplas podem ser obtidas, às vezes mais rapidamente pelo uso deste método de análise numérica, que por outros métodos.

Em alguns casos pode não ser possível encontrar uma distribuição teórica padrão que descreva um processo estocástico particular, ou algum componente de tal processo. Nesses casos o processo estocástico pode ser reproduzido (ou simulado), apenas através da amostragem de distribuições empíricas e não por intermédio de alguma distribuição teórica bem conhecida. Isto, naturalmente, presume a existência de dados empíricos.

É aconselhável considerar primeiramente a utilização de distribuições teóricas padrão. Se nenhuma das distribuições padrão descrever adequadamente o comportamento do processo, então devemos necessariamente recorrer a distribuições empíricas.

O método de Monte Carlo baseia-se em um processo de geração de números aleatórios para simulação a partir de uma dada distribuição.

$$F_i = f_i(rx, ry) \quad (B.1)$$

Onde:

$i = 1, 2, \dots, nf-1$, nf (número de faixas do histograma);

F_i - faixas no intervalo entre a mínima e máxima corrente de curto-circuito.

Procede-se os cálculos das variáveis aleatórias rx e ry , de acordo com uma distribuição de probabilidade $p(rx)$ e $p(ry)$ respectivamente. Para tal, $p(rx)$ e $p(ry)$ deverão estar normalizadas para 1,0 no intervalo de integração, satisfazendo a seguinte expressão:

$$\int_a^b p(t) \cdot dt = 1,0 \quad (B.2)$$

$$rx = a + r \cdot (b - a) \quad (B.3)$$

B.2. Intervalo de confiança e nível de significância

A idéia básica de intervalo de confiança nos permite chegar próximo a um valor desconhecido da população, utilizando-se informações de uma amostra. Chamamos o único número que representa o valor mais plausível do parâmetro, baseado em dado da amostra, de estimativa pontual. Contudo, sabemos que o valor estimado na maior parte das vezes não será exatamente igual ao valor verdadeiro. Então é interessante encontrar um *intervalo de confiança* que forneça um intervalo de valores plausíveis para o parâmetro baseado nos dados amostrais.

Um intervalo de confiança de 95% para um parâmetro populacional fornece um intervalo no qual estaríamos 95% confiantes de cobertura do verdadeiro valor do parâmetro. Tecnicamente, 95% de todos os intervalos de confiança que construirmos conterão o verdadeiro valor do parâmetro, dado que todas as suposições envolvidas estejam corretas [17].

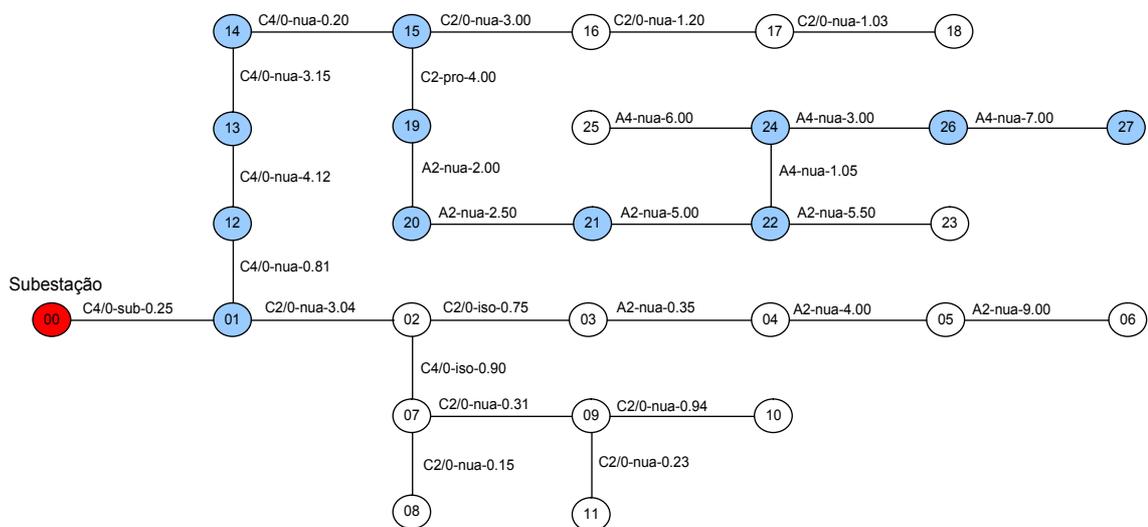
Um *intervalo de confiança* dá um intervalo de valores, centrado na estatística amostral, no qual julgamos, com um risco conhecido de erro, estar o parâmetro da população[18].

Nível de significância de um teste é a probabilidade de uma hipótese nula ser rejeitada, quando verdadeira [18].

Apêndice C

Topologia e parâmetros do alimentador utilizado nas simulações

C.1. Diagrama unifilar do alimentador



C.2. Dados da barra da subestação

nome	Caso Base						
r1	x1	r0	x0	kv	MVA	3Zfm	3Zfx
0,03	0,5	0,53	0,15	13,8	100	0	100

C.3. Características do disjuntor

Marca	Modelo	Tensão	Inominal	Cap_Interrup	Nr_Op_In	Nr_Op_lcc
Siemens	3AH5	17,5	1250	15000	10000	25

C.4. Impedâncias dos ramos do alimentador

Barra	Fonte	r1 pu	x1 pu	r0 pu	x0 pu	km	Padrão
0	0	0,0300	0,5000	0,5300	0,1500	0,00	-
1	0	0,0247	0,0551	0,0479	0,2465	0,25	sub
2	1	0,3001	0,6704	0,5827	2,9979	3,04	nua
3	2	0,0740	0,1654	0,1437	0,7396	0,75	iso
4	3	0,0346	0,0772	0,0671	0,3451	0,35	nua
5	4	0,3949	0,8822	0,7666	3,9445	4,00	nua
6	5	0,8885	1,9849	1,7250	8,8752	9,00	nua
7	2	0,0888	0,1985	0,1725	0,8875	0,90	iso
8	7	0,0148	0,0331	0,0287	0,1479	0,15	nua
9	7	0,0306	0,0684	0,0594	0,3057	0,31	nua
10	9	0,0928	0,2073	0,1802	0,9270	0,94	nua
11	9	0,0227	0,0507	0,0441	0,2268	0,23	nua
12	1	0,0800	0,1786	0,1552	0,7988	0,81	nua
13	12	0,4067	0,9086	0,7896	4,0629	4,12	nua
14	13	0,3110	0,6947	0,6037	3,1063	3,15	nua
15	14	0,0197	0,0441	0,0383	0,1972	0,20	nua
16	15	0,2962	0,6616	0,5750	2,9584	3,00	nua
17	16	0,1185	0,2647	0,2300	1,1834	1,20	nua
18	17	0,1017	0,2272	0,1974	1,0157	1,03	nua
19	15	0,3949	0,8822	0,7666	3,9445	4,00	pro
20	19	0,1974	0,4411	0,3833	1,9723	2,00	nua
21	20	0,2468	0,5514	0,4792	2,4653	2,50	nua
22	21	0,4936	1,1027	0,9583	4,9307	5,00	nua
23	22	0,5430	1,2130	1,0541	5,4238	5,50	nua
24	22	0,1481	0,3308	0,2875	1,4792	1,50	nua
25	24	0,5923	1,3233	1,1500	5,9168	6,00	nua
26	24	0,2962	0,6616	0,5750	2,9584	3,00	nua
27	26	0,6910	1,5438	1,3416	6,9030	7,00	nua