

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001037



Nº 10

METODOLOGIAS PARA CÁLCULO E ANÁLISE
ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS DE CURTO-CIRCUITO
PARA FALTAS NAS LINHAS
ALUNO: JOÃO RICARDO BENETOLI DURAN
ORIENTADOR: LUIZ FERNANDO BOVOLATO

Te.1037

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIAS PARA CÁLCULO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE
PARÂMETROS DE CURTO-CIRCUITO PARA FALTAS NAS LINHAS**

1210001037



Proc. 233/97. UED 115/97 MFN-485

UNESP - "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE RECEBIMENTO	DATA DE TOMBAMENTO
03.07.97	30.07.97
RECEBIMENTO	TOMBO
le	Te. 1037
CLASSIFICAÇÃO	
Classificação \$10.00 Autor	621.319.2 D 948 m

"Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira - Unesp, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica"

1210001037



João Ricardo Benetoli Duran

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

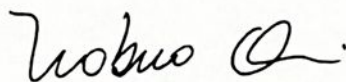
Ilha Solteira, Dezembro de 1996

BCplS - FEIS - UNESP

**METODOLOGIAS PARA CÁLCULO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE
PARÂMETROS DE CURTO-CIRCUITO PARA FALTAS NAS LINHAS**

JOÃO RICARDO BENETOLI DURAN

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA -
UNESP, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).



NOBUO OKI, D.Sc - COORDENADOR

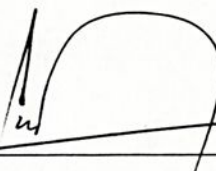
BANCA EXAMINADORA



LUIZ FERNANDO BOVOLATO, D.Sc. - ORIENTADOR



EUNO SATO, D.Sc.



LUIS CARLOS ORIGAS DE OLIVEIRA, D.Sc.

ILHA SOLTEIRA, DEZEMBRO DE 1996

BCpIS - FEIS - UNESP

Á DEUS

...que, incomparável e inconfundível na sua infinita bondade, compreendeu os meus anseios e me deu a necessária coragem para atingir os meus objetivos, ofereço o meu porvir e peço forças para sempre agir com eficiência em meu trabalho e acerto em minhas decisões.

BCp13 - FEIS - UNESP



AOS MEUS PAIS

Clemente e Marcilia, que através do amor, confiança e liberdade, possibilitaram que eu chegasse onde estou e além de compreenderem minhas ausências, deram-me estímulos para prosseguir e hoje compartilham comigo a alegria desta conquista.

A vocês, o meu muito obrigado e que Deus retribua aquilo que eu mesmo não sou capaz.

BCpIS - FEIS - UNESP



AGRADECIMENTOS

`A FAPESP, pelo apoio financeiro, sem o qual não seria possível a realização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato, pelo exemplo de competência na orientação segura do desenvolvimento desta investigação. Mas, sobretudo, pela amizade e compreensão que sempre me dispensou.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica - FEIS/UNESP, em especial à Deoclécio Mitsuiti Kosaka e a todos que de uma forma tiveram participação neste processo.

`A Maria Isabel Cuenca Alegria, colega de todas as horas e companheira constante desta caminhada, com quem pude compartilhar as dificuldades e me fortalecer quando me senti desanimado.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação, em especial à turma de Mestrado de 1994. Foi bom conhecê-los e dividirmos juntos momentos de estudo e também os de alegrias e descontração.



Este trabalho trata de um estudo comparativo entre metodologias desenvolvidas para o cálculo de correntes de curto-circuito em linhas de transmissão, através da análise estatística dos resultados levantados.

Os estudos de curto-circuito, em geral, apresentam parâmetros para a condição de falta nas barras. Aqui foi assumida uma distribuição equiprovável de ocorrência de defeito ao longo do comprimento da linha através de duas maneiras distintas, denominadas método direto e método indireto.

A aplicação desses métodos e seus procedimentos à rede de energia que se quer estudar, produz as distribuições de frequências de correntes de curto-circuito. Com base em informações levantadas a partir destes histogramas de correntes, são interpretados os valores determinados experimentalmente através de uma função contínua.

A distribuição gama foi assumida como sendo a que melhor explica as distribuições de frequências de correntes observadas. A verificação da aderência da distribuição gama, com relação às distribuições observadas, é realizada através do método de Kolmogorov-Smirnov.

This work deals with a comparative study between methodologies developed for short-circuit current calculus in transmission lines by means of statistical analysis of the obtained results.

The short-circuit studies, in general, present parameters for the fault condition on the buses. It was assumed an probably distribution of fault incident along the lines using two different ways, named direct and indirect methods.

The application of these methods to the electrical network, give the distribution of the short-circuit currents. Based on the information obtained from these histograms of currents, the values experimentally determined are interpreted using a continuous function.

The gamma distribution was assumed as being the one that better explain the frequency distribution of the observed currents. Aiming to verify the adherence of the gamma distribution with relation to the interpretation of the experimental data, the Kolmogorov-Smirnov test was utilized.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	01
1 - OS ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO	01
2 - O ESTADO DA ARTE	02
3 - A DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	09
4 - CONSIDERAÇÕES NA OBTENÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	10

CAPÍTULO II

TÉCNICAS UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS	11
1 - INTRODUÇÃO	11
2 - TÉCNICA DE INSERÇÃO DE BARRA	12
2.1 - Etapas do Procedimento de Inserção de Barra	13
3 - TÉCNICA DE ABERTURA DE LINHAS	14
3.1 - Linhas sem Acoplamento Mútuo	14
3.2 - Linhas com Acoplamento Mútuo	15
3.3 - Etapas do Procedimento de Abertura de Linhas	17

CAPÍTULO III

NOÇÕES GERAIS DE ESTATÍSTICA	18
1 - INTRODUÇÃO	18
2 - DISTRIBUIÇÃO UNIFORME.....	19
3 - DISTRIBUIÇÃO GAMA	20
4 - A CIÊNCIA ESTATÍSTICA	22
4.1 - A Estatística Descritiva	22
4.1.1 - Descrição Gráfica	23
4.1.2 - Descrição Gráfica das Variáveis Quantitativas Contínuas - Classes de Frequências	24
4.1.3 - Características Numéricas de uma Distribuição de Frequências	24
4.1.3.1 - Medidas de Posição	25
4.1.3.1.1 - Média	25

4.1.3.1.2 - Mediana	25
4.1.3.1.3 - Quartis	26
4.1.3.2 - Medidas de Dispersão	27
4.1.3.2.1 - Variância	27
4.1.3.2.2 - Desvio-Padrão	28
4.2 - A Estatística Indutiva	28
4.2.1 - Estimação de Parâmetros	28
4.2.2 - Testes de Hipóteses	29
5 - TESTES NÃO-PARAMÉTRICOS	31
5.1 - Testes de Aderência	31
5.1.1 - Método de Kolmogorov-Smirnov	32

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA PROPOSTA	33
1 - INTRODUÇÃO	33
2 - MÉTODO DIRETO	33
2.1 - Critérios de Classificação	34
2.1.1 - Correntes de Curto-Circuito	34
2.1.2 - Constantes de Tempo	34
2.2 - Método Direto com Abertura de Linhas	34
2.3 - Método Direto com Inserção de Barra	34
2.3.1 - Etapas de Obtenção de Correntes de Curto-Circuito ao Longo das Linhas.....	35
2.3.2 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Constantes de Tempo	37
3 - MÉTODO INDIRETO	38
3.1 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Correntes de Curto-Circuito nas Barras.....	38
Procedimento A	39
Procedimento B	39
3.2 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Comprimentos de Linhas	40
3.3 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Correntes de Faltas nas Linhas	41

CAPÍTULO V

RESULTADOS OBTIDOS E COMPARAÇÕES	43
1 - CONSIDERAÇÕES	43
2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	45
3 - ANÁLISES E CONCLUSÕES	83

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
3 - DIVULGAÇÃO DA PESQUISA.....	90

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFIA	91
---------------------------	-----------

CAPÍTULO VIII

APÊNDICE	93
1 - DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DE INSERÇÃO DE BARRA	93
2 - DESENVOLVIMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES DE FALTAS NAS LINHAS.....	97

1 - OS ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO

Os estudos de curto-circuito permitem definir características dos componentes das instalações, seja em planejamento, em projeto, em substituição daqueles existentes ou em consequência de ampliação da rede.

Geralmente calculam o parâmetro de curto-circuito para a condição de falta nas barras das subestações, não fornecendo informação sobre o comportamento deste parâmetro para pontos de defeitos ao longo do comprimento das linhas, como de fato na maioria das vezes ocorre.

Quando se pretende avaliar a solicitação sobre equipamentos em uma subestação em relação à efetiva distribuição probabilística dos parâmetros de curto-circuito é necessário o levantamento destes parâmetros.

A aproximação probabilística, quando comparada com aquela baseada sobre o valor determinístico do parâmetro para faltas nas subestações é, em seu limite máximo, menos conservadora, podendo permitir redução no dimensionamento de certos equipamentos, ou ainda retardar sua substituição.

A finalidade é obter elementos que possam criar condições para o aperfeiçoamento dos métodos que a engenharia utiliza para especificar componentes do sistema de proteção contra curto-circuito.

São propostas, desenvolvidas, implementadas e comparadas metodologias que permitem o levantamento de distribuições estatísticas de correntes de curto-circuito ao longo do comprimento de todas as linhas do sistema considerado.



2 - O ESTADO DA ARTE

A adoção de procedimentos probabilísticos é justificada pelo comportamento de parâmetros de natureza aleatória em sistemas elétricos de potência, tratados de forma determinística e associados com fatores de segurança em geral conservativos.

O desenvolvimento de ferramentas para planejamento e projetos em sistemas de energia elétrica, que levem em conta que alguns parâmetros são melhor descritos por distribuições estatística, vem sendo alvo de investigações.

A corrente de curto-circuito é um dos parâmetros mais importantes no planejamento de um sistema, pois afeta o projeto de barramentos, aterramentos, equipamentos em subestações, máquinas rotativas e, em consequência, quase que todos os aspectos do planejamento deste sistema. Os parâmetros chave de estudos desta natureza são as distribuições de probabilidade de correntes de curto-circuito, que podem ser transformadas em distribuições de probabilidade de uma outra grandeza de interesse com propósito de dimensionamento e/ou especificação.

Existem diversas publicações nesta linha de pesquisa, cujo conteúdo é voltado para a adoção de técnicas probabilísticas no projeto de componentes de subestações, estudos de coordenação de isolamento, projetos estruturais, etc.

A partir de resultados obtidos para as correntes de faltas é possível quantificar a probabilidade de ocorrer determinadas magnitudes de correntes de defeito nas barras ou linhas, permitindo deste modo elaborar, por exemplo, projetos mais justos de barramentos de subestações. Conseqüentemente, custos mais reduzidos podem ser obtidos sem comprometer a confiabilidade do sistema [11, 12 e 17]. A proteção do sistema pode ser tratada de forma mais ampla, assim como a determinação quantitativa da confiabilidade do sistema e segurança pessoal [11, 12, 17 e 20], devido a riqueza de informação destes métodos. Em [09] são descritos os aspectos analíticos e computacionais da aplicação da distribuição das correntes de faltas na determinação de potenciais de passo e toque nas proximidades de estruturas de linhas de transmissão de energia.

Os autores Ford e Srivatava, publicaram em 1981, um artigo onde apresentam um projeto de subestações empregando enfoque estatístico. Neste trabalho foi utilizada a técnica analítica [11] que viria a ser publicada no ano seguinte.

Em [10], publicado em 1982, os autores Ford e Sengupta desenvolveram um método analítico, que emprega a teoria das probabilidades, para a obtenção da distribuição densidade de probabilidade de correntes de curto-circuito trifásico, sendo conhecida a densidade de



probabilidade da localização da falta sobre a linha. A formulação inicial é desenvolvida para configurações radiais simples e vai sendo estendida para configurações radiais mais complexas, com a geração equivalente sendo simulada pela variação da impedância da fonte equivalente de acordo com esquemas de geração. A formulação para sistemas multi-fontes que não sejam radiais a partir da barra de interesse é complexa, mesmo considerando o sistema dividido em sub-sistemas e empregando o teorema da superposição. O método é aplicado a uma região bem restrita do sistema Ontario Hydro, sendo o restante do sistema representado por equivalentes, e a região de interesse sofrendo grande número de aproximações e simplificações, permitindo assim formular as expressões. Os resultados da aplicação do método analítico, ao sistema mencionado são comparados com os resultados de 5000 simulações do método de Monte Carlo, mostrando que as funções densidade têm a mesma forma geral e que os resultados analíticos apresentam boa aproximação. O decréscimo na precisão é compensado por uma significativa diminuição no esforço computacional. A grande desvantagem, entretanto, para o método analítico é que a análise e os programas são específicos para o sistema estudado, não podendo ser escritos de forma generalizada. Observa-se que a curva da distribuição densidade de probabilidade, apresentada como resultado e obtida pela interligação dos pontos por segmentos de reta, chama atenção para a possibilidade de representar tais resultados através da função gama, fato não comentado pelo artigo.

O artigo [06] foi publicado em 1983 e o autor El-Kady apresenta as bases analíticas para representar a aleatoriedade das condições do sistema e faltas, sendo as variações de disponibilidade de geração, transmissão e condições de faltas estimadas com base em registro histórico. Investiga também técnicas computacionais que possibilitem a minimização do tempo e requisitos de memória, pelo emprego de esquemas de armazenamento eficiente e formulação adequada. Neste sentido sugere a formação da matriz de admitâncias nodais com a finalidade de explorar sua esparsidade e propõe que a análise das faltas seja executada com o emprego de impedâncias nodais devido a sua maior elegância e simplicidade diante das admitâncias, especialmente quando o processo é repetitivo. Todo este esforço tem por objetivo viabilizar de forma eficiente a simulação do método de Monte Carlo para determinação da distribuição de probabilidade de correntes de falta em uma limitada região do sistema.

Ainda em 1983, é publicado o artigo [08] no qual os autores El-Kady e Ford descrevem um programa computacional para análise probabilística de faltas usando simulação de Monte Carlo. O programa foi desenvolvido empregando o conteúdo do trabalho [06] e explora o esquema de memória dinâmica. Pode simular faltas simétricas e assimétricas nas barras e/ou ao longo das linhas em posições definidas em consonância com as tendências observadas nos registros históricos, nas quais são introduzidas barras auxiliares com propósito de modelagem.



A função do programa é fornecer distribuições de probabilidade de correntes de faltas devendo ser provido com as variações aleatórias dos dados do sistema e faltas.

No artigo [01] publicado em 1986, os autores Balouktsis, Tsanakas e Vachtsevanos apresentam o método de Monte Carlo e um outro analítico, nos quais é empregada a matriz de admitância de barra para obtenção das correntes de faltas. Na simulação do método de Monte Carlo, que incorpora a aproximação analítica proposta, as faltas são aplicadas repetitivamente no sistema e a ocasião em que ocorrem, sua localização e tipo são modeladas usando um gerador de números aleatórios, levando-se em consideração informações estatísticas disponíveis a respeito destas variáveis. Em cada ponto de falta é introduzida uma barra auxiliar e os novos elementos da matriz de impedâncias de barras aumentada calculados a partir dos elementos da matriz original, localização da falta e impedância da linhas sob falta. A formulação desenvolvida com base na teoria das probabilidades considera a corrente de falta como uma variável aleatória dependente do estado do sistema, da linha sob falta e da localização da falta. Sendo a influência do estado dos sistema e da linha sob falta caracterizada através de valores constantes e específicos de probabilidade da rede em análise, fornecidos como dados de entrada, obtendo-se uma inequação polinomial em função da localização da falta. Determinada(s) a(s) raiz(es) real(is) positiva(s) e menor(es) que a unidade, tem-se a região de localização da falta para a estimação da distribuição de probabilidade acumulada. Assim, é possível calcular a probabilidade de que correntes de falta de magnitudes menores ou iguais a um valor arbitrado circulem em uma linha quando ocorrerem faltas em outra linhas da rede. Esta formulação dispensa as simplificações e considerações de linearidade da rede estabelecidas no método proposto em [10]. O procedimento analítico, como apresentado, é aplicável somente para faltas simétricas. Estas duas técnicas, aplicadas a um sistema teste simples composto por cinco barras, apresentaram resultados próximos, sendo o esforço computacional muito menor no caso do método analítico.

No desenvolvimento do trabalho [16], publicado em 1988, os autores Papadias, Hatziargyryion e Tsanakas, utilizando grande parte do conteúdo do artigo [01], desenvolveram uma formulação analítica mais abrangente que incorpora diferentes tipos de faltas. O procedimento apresentado também utiliza a matriz de impedância de barra, com seus elementos sendo recalculados para os pontos de falta. O método é testado com o sistema de transmissão da Grécia considerando três estados de operação com sua respectivas probabilidades e com os dados estatísticos de um histórico de faltas. Como resultados da aplicação são apresentadas as distribuições densidade de probabilidade da corrente de falta induzida em algumas linhas do sistema.



A simulação do método de Monte Carlo permite uma representação detalhada do sistema e por essa razão produz resultados bem precisos. Esta riqueza de detalhes fica, entretanto, sujeita a restrições de ordem computacional [01, 06, 08].

O procedimento de Monte Carlo simula o sistema de potência sob condições de falta aplicando curto-circuito em ocasiões aleatórias, aleatoriamente localizadas na rede. A ocasião da falta e sua localização são extraídas aleatoriamente de distribuições de densidade de probabilidade para as distribuições de faltas das linhas na rede, localização das faltas nas linhas e ocasião de ocorrências das faltas. O comprimento, o nível de isolamento, a proteção contra descargas atmosféricas, o terreno e fatores ambientais são alguns dos parâmetros que determinam a composição de faltas nas linhas. Casos registros atualizados de faltas não sejam disponíveis, emprega-se a distribuição de falta na linha em proporção ao seu comprimento como uma aproximação razoável para linhas em uma limitada região. Os dados do sistema com relação a localização da falta sobre as linhas são bastante limitados. Neste caso emprega-se uma distribuição típica com alguns diferentes valores de densidade de probabilidade, sendo o maior deles para representar os trechos da linha que atravessam regiões com condições ambientais adversas ou regiões onde a incidência de descargas atmosféricas é mais freqüente. No caso de linhas expostas a condições ambientais e atmosféricas uniforme assume-se apenas um valor.

Os dados de falta do sistema são usados para estabelecer uma distribuição de faltas ao longo do tempo, discretizadas em intervalos de um mês, podendo ser discretizadas para outros intervalos.

Uma das facilidades do método de Monte Carlo é que ele pode acomodar convenientemente, sem simplificações, distribuições bem complicadas. Sua maior desvantagem é o tempo de processamento consumido e os rigorosos requisitos de programação para alcançar níveis práticos de eficiência para o programa.

Sendo assim, começaram a ser formulados os métodos analíticos e desenvolvidas suas expressões uma vez que envolvem muito menos esforço computacional que o método anterior, embora em certos casos esta vantagem possa ser maculada por uma relativa redução na precisão dos resultados [01, 10 e 16].

Geralmente, o método envolve a determinação da distribuição da variável aleatória contínua corrente de curto-circuito circulando em uma linha considerando-a como uma variável dependente das variáveis aleatórias discretas tais como estado do sistema, tipo de falta, linha sob falta e da variável aleatória contínua local da falta. O ponto de ocorrência da falta é representado por uma barra auxiliar e fica caracterizado pela sua distância em relação aos extremos originais da linha e pelas impedâncias própria e mútuas relativas a estes terminais. Os



estados do sistema comumente empregados são aqueles relativos às cargas leve, média e pesada expressos por suas respectivas probabilidades. As linhas sob falta e os tipos de falta são caracterizados por suas respectivas probabilidades. O valor de corrente arbitrado e empregado na função de distribuição é considerado para cada estado do sistema, linha sob falta e tipo de falta.

Os autores Bovolato, Ribeiro e Galvão apresentaram os artigos [02] e [03] publicados em 1995, contribuindo com o desenvolvimento de métodos capazes de gerar resultados dentro de uma boa precisão, com a vantagem de exigir menor esforço computacional em relação a dificuldade de implementação, requisitos de memória e tempo de processamento. Neste trabalho foram propostos dois métodos, denominados direto e indireto. No desenvolvimento destes métodos considera-se uma distribuição equiprovável de ocorrência de defeito ao longo das linhas de transmissão.

No método direto calculam-se as correntes de falta para todos os possíveis pontos ao longo do comprimento das linhas, definidos por posições sucessivas separadas entre si por uma distância constante. Estabelece-se que as faltas ocorram nestes pontos, a partir de um dos extremos da ligação, estando a outra extremidade aberta através de seu correspondente disjuntor. Isto é equivalente a eliminar a ligação entre as duas barras e, em seguida, ir incrementando o valor da impedância vista por uma delas com o valor de impedância correspondente ao comprimento de linha definido pelo ponto sob falta. Com a impedância assim obtida determina-se o valor da corrente de falta para a posição considerada. A abertura de um dos extremos da linha, representa uma das condições mais severas.

Os valores de correntes observados foram agrupados em classes, estabelecidas em conformidade com valores de capacidade de interrupção nominal de curto-circuito tabelados na norma NBR 7118. Foram consideradas as faltas trifásicas isolada, bifásicas isolada e monofásicas.

Os métodos foram aplicados ao sistema Sul / Sudeste brasileiro reduzido às barras da rede de 440 kV do sistema CESP, conduzindo a resultados bastante expressivos.

Verificou-se que as distribuições de frequências de correntes observadas revelavam-se assimétricas, baseando-se nessa constatação, procurou-se por uma função contínua que interpretasse as distribuições observadas, impondo-se, a igualdade das médias e desvios-padrões, assumiu-se a distribuição Gama como sendo a que melhor explica os resultados. A verificação de aderência da distribuição Gama, com relação às distribuições observadas, foi realizada através do método de Kolmogorov-Smirnov.



No método indireto, obtém-se a distribuição de correntes de falta ao longo das linhas considerando-se conhecidas as distribuições de correntes de defeito nas barras das subestações e as distribuições de comprimentos das linhas conectadas. Assume-se, também, uma distribuição uniforme de probabilidade de defeito ao longo das linhas e admite-se a independência entre as correntes de falta nas barras e os comprimentos das linhas a elas ligadas. A distribuição de correntes de faltas nas barras é obtida de duas maneiras. Na primeira, calcula-se o valor da corrente de falta na barra. Em seguida, após eliminar uma das linhas conectadas diretamente à mesma, obtém-se novo valor de corrente de falta. O processo é repetido até que todas as linhas, tenham sido desconectadas e os valores de corrente de defeito no nó calculados. A cada valor de corrente encontrado atribui-se cumulativamente peso unitário. Assim, após aplicar a sistemática a todas as barras da rede tem-se a distribuição relativa ao número de curtos-circuitos simulados.

Na outra determina-se a corrente de falta na barra apenas para a condição de maior conexão e acumula-se ao valor encontrado um peso igual ao número de ligações que concorrem para a mesma. Desta forma, uma vez processadas todos nós, dispõe-se da distribuição de correntes de faltas nas barras em relação ao número total de ligações das barras da rede.

Obtém-se a distribuição dos comprimentos das linhas agrupando-as segundo a classe definida pelo valor da corrente de curto na barra de alimentação de cada uma das linhas.

Nos dois métodos examinou-se apenas o valor eficaz da componente simétrica das correntes. A componente unidirecional não é obtida, fornecendo-se para ela a distribuição de constantes de tempo a todos os pontos de defeito examinados.

No desenvolvimento do trabalho [18], publicado em 1994, os autores Sato, Garcia e Monticelli descrevem as implementações paralelas e distribuídas para análise de curto-circuito probabilístico pelo método de Monte Carlo. É descrito um programa que gera uma exata estimativa das curvas de distribuição de probabilidade da corrente de curto-circuito, que podem ser usadas em uma variedade de estudos de planejamento e projetos. Ambos aspectos da modelagem da rede, assim como o equivalente da rede reduzida e a representação do acoplamento mútuo, bem como o impacto do tamanho da amostra usada nas simulações são completamente analisados e ilustrados por resultados numéricos obtidos testando sistemas reais. Os exemplos ilustram como a eficiência computacional em máquinas paralelas varia com a proporção de comunicação para o processamento e o balanço de carga entre processadores do computador paralelo. Pode-se observar ainda que os resultados obtidos, isto é, a distribuição de probabilidade das correntes de falta podem ser explicadas pela função Gama.



Este trabalho, fundamentado em [02] e [03], tem como objetivo desenvolver e implementar programas computacionais que permitam levantar a função densidade de probabilidade da corrente de curto-circuito, estabelecendo comparações entre estas e as desenvolvidas em [02] e [03], no tocante a qualidade dos resultados e requisitos de computação, tendo em vista a utilização desta ferramenta no dimensionamento e especificação de componentes de sistemas elétricos de potência. O parâmetro chave em estudo desta natureza é a distribuição de probabilidade de corrente de falta. Assim, procedeu-se a este levantamento através da simulação sistemática de faltas trifásicas isoladas, bifásicas isoladas e monofásicas, ao longo da linha, através da inserção de uma barra auxiliar em todos os possíveis pontos de defeito. Os valores observados foram agrupados em classes, segundo a norma NBR 7118. É importante observar que a consideração da falta ser alimentada apenas por um dos extremos da ligação é, na maioria dos casos, a mais grave em relação aos níveis de corrente de curto-circuito. O levantamento da função de distribuição acumulada da variável casual corrente de falta nas linhas foi realizada admitindo a independência entre as grandezas corrente de falta nas barras e comprimento das linhas. Esta formulação foi desenvolvida para falta monofásica, uma vez que já o foi para faltas trifásicas isoladas em [02] e [03], tendo por objetivo complementar os trabalhos citados, permitindo comparações, entre as metodologias.



3 - A DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Para o levantamento das distribuições de correntes de curto-circuito são desenvolvidos e implementados métodos, denominados direto e indireto. No desenvolvimento destes métodos considera-se uma distribuição equiprovável de ocorrência de defeito ao longo das linhas.

No método direto promove-se a simulação sistemática de faltas trifásicas isoladas e monofásicas, ao longo da linha, considerando a inserção de um barra auxiliar em todos os pontos de defeito, agrupando-se os valores de correntes observados em classes, estabelecidas de acordo com valores de capacidade de interrupção nominal de curto-circuito de disjuntores tabelados na norma NBR-7178. Observa-se ainda que o cálculo de faltas ao longo das linhas é obtido sem abertura das mesmas.

No método indireto, obtém-se a função de distribuição acumulada da variável casual corrente de curto-circuito nas linhas, considerando-se conhecidas as distribuições de correntes de defeito nas barras e as distribuições de comprimentos de linhas a elas conectadas e admite-se a independência entre estas grandezas. A distribuição de correntes de faltas nas barras é obtida de duas maneiras. Na primeira calcula-se o valor da corrente de falta na barra. Em seguida, após eliminar uma das linhas conectadas à mesma, obtém-se novo valor de corrente de falta. O processo é repetido até que todas as linhas tenham sido desconectadas. Na outra determina-se a corrente de falta na barra apenas para a condição de maior conexão e acumula-se ao valor encontrado um peso igual ao número de ligações que concorrem para a mesma.

Obtém-se a distribuição dos comprimentos das linhas agrupando-as segundo a classe definida pelo valor de corrente de falta na barra de cada uma das linhas.

Implementou-se esta formulação para o curto-circuito fase-terra, uma vez que para faltas trifásicas isoladas já o foi em [02] e [03].

As frequências de correntes de curto-circuito são expressas em valores relativos ao número total de pontos e são apresentadas na forma de histogramas.

A verificação de aderência da distribuição gama, com relação às distribuições observadas, é realizada através do método de Kolmogorov-Smirnov. Com a aplicação deste método confirma-se a aderência da interpolação com os níveis de significância adotados, mostrando que a distribuição gama representa bem os resultados observados.

Nos dois métodos examina-se apenas o valor eficaz da componente simétrica das correntes. A componente unidirecional não é obtida, fornecendo-se para ela a distribuição de constante de tempo correspondente a todos os pontos de defeitos examinados.



4 - CONSIDERAÇÕES NA OBTENÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Na obtenção das correntes de curto-circuito ao longo do comprimento das linhas de transmissão, considera-se que a linha na qual ocorre o defeito seja alimentada pelas duas extremidades. Em [02] e [03] considera-se a linha sendo alimentada por um dos extremos da ligação. Isto representa a mais grave condição relativamente aos níveis de corrente de curto-circuito.

Adotam-se as seguintes considerações para os cálculos:

- São desprezadas as cargas da rede;
- A falta é franca;
- A tensão nominal de fase da barra, antes da falta, como sendo 1.0 p.u.;
- A tensão pré-falta como sendo 110% da tensão nominal;
- Apenas a componente subtransitória simétrica da corrente de curto-circuito é considerada.

As correntes de curto-circuito são determinadas para os defeitos:

- Trifásico isolado;
- Bifásico isolado;
- Monofásico.



1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os conceitos das técnicas de inserção de barra e abertura de ligações empregadas no desenvolvimento dos procedimentos dos métodos direto e indireto, para a obtenção das correntes de curto-circuito nas barras e ao longo das linhas de transmissão.

No método direto as distribuições de correntes de curto-circuito são determinadas utilizando-se a técnica de inserção de barra.

Esta técnica utiliza equações para calcular os elementos da matriz impedância de barra sem a necessidade de inversão de matrizes. Desta forma a matriz de impedância nodal original não sofre alterações em seu elementos, apenas a inclusão de uma linha e uma coluna referentes a inserção da barra auxiliar.

No método indireto utiliza-se a técnica de abertura de linhas, que envolve a criação de uma barra fictícia que deverá ser eliminada empregando-se a redução de Kron.

Na abertura de linhas sem ligações mútuas emprega-se apenas a redução de ordem, enquanto que a inversão e redução de ordem de uma matriz são utilizadas quando se promove a remoção de linhas acopladas magneticamente. O método de Shipley-Coleman é usado na inversão e o método de Kron na redução de ordem.



2 - TÉCNICA DE INSERÇÃO DE BARRA

Na técnica de inserção de barras definida em [01], considera-se uma linha de transmissão genérica **pq**, conforme mostrada na figura II.1, na qual supõe-se a ocorrência de uma falta em uma localização **m** entre as barras **p** e **q** a uma distância λL_{pq} da barra **p**, sendo $0 < \lambda < 1$ e L_{pq} o comprimento total da linha. As impedâncias dos trechos (p,m) e (m,q) são:

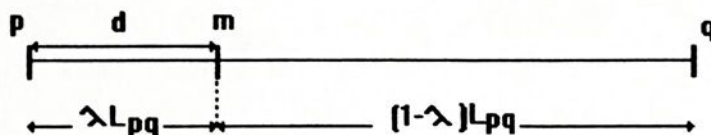


Figura II.1 - Linha de transmissão genérica **pq**.

$$Z_{pm} = \lambda Z_{pq} \quad (\text{II-1})$$

$$Z_{mq} = (1 - \lambda) Z_{pq} \quad (\text{II-2})$$

sendo: $\lambda = \frac{d}{L_{pq}}$ e d - distância da localização da falta com relação a um dos extremos.

Os elementos da matriz de barra Z^b incluindo a barra **m** serão dados por:

$$Z_{mr}^b = (1 - \lambda) Z_{pr} + \lambda Z_{qr} \quad (\text{II-3})$$

$$Z_{mm}^b = (1 - \lambda)^2 Z_{pp} + \lambda^2 Z_{qq} + 2\lambda (1 - \lambda) Z_{pq} + \lambda (1 - \lambda) z_{pq} \quad (\text{II-4})$$

sendo:

Z_{pp} - impedância vista da barra **p**;

Z_{qq} - impedância vista da barra **q**;

Z_{pq} - impedância de transferência **p-q**;

z_{pq} - impedância da ligação **p-q**;

r - indexador variando de 1 até o número de barras da matriz **Z** original.

2.1 - Etapas do Procedimento de Inserção de Barra

Considere-se que uma linha genérica **pq** da rede em estudo esteja sendo processada, assim tem-se as etapas do procedimento de inserção de barras, como segue:

- 1 - Extraí-se da matriz de impedâncias de barra de seqüência positiva e zero as impedâncias próprias e de transferência da ligação **pq**, na qual será inserida a barra auxiliar ;
- 2 - Extraí-se do arquivo de dados a impedância da ligação **pq**;
- 3 - Calcula-se as impedâncias de seqüência positiva e zero vistas da barra auxiliar **m**, ao longo do comprimento da linha **pq**, utilizando as equações (II-3) e (II-4);
- 4 - Incrementa-se o valor da distância **d** em uma unidade (1 km), definindo o novo ponto de falta;
- 5 - Repete-se as etapas 3 e 4 até que a variável **d** assuma o valor do comprimento da linha **pq**.



3 - TÉCNICA DE ABERTURA DE LINHAS

Na técnica de abertura de linhas, consideram-se conhecidas as matrizes de impedâncias nodais de sequência positiva e zero, as impedâncias próprias de sequência positiva e zero e as impedâncias mútuas de sequência zero de todas as linhas de transmissão da rede em estudo.

3.1 - Linhas sem Acoplamento Mútuo

Uma linha de transmissão de um sistema pode ser aberta ou removida, adicionando-se uma linha em paralelo à existente. A impedância da linha que está sendo adicionada é igual à impedância da linha sendo removida, em módulo, apenas com sinal negativo.

A figura II.2 ilustra a simulação de abertura da ligação **pq** que deve ser removida com a introdução da nova ligação **pq**.

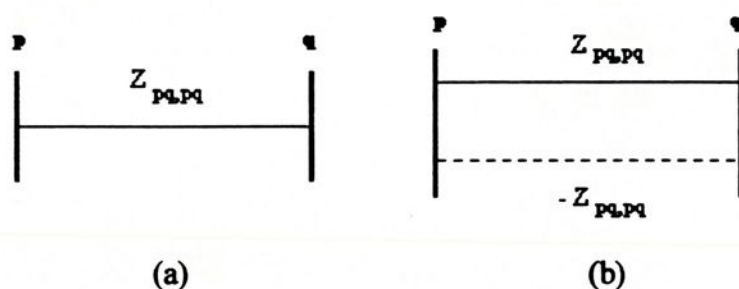


Figura II.2 (a) - Ligação **pq** a ser removida;

(b) - Ligação **pq** introduzida para remoção da anterior.

A adição da nova ligação **pq**, cria uma barra fictícia **l** com os elementos correspondentes à linha e coluna desta barra dadas por:

$$Z_{pl} = Z_{lp} = Z_{pp} - Z_{qp} \quad (\text{II-5})$$

$$Z_{ql} = Z_{lq} = Z_{pq} - Z_{qq} \quad (\text{II-6})$$

$$Z_{ll} = Z_{pl} - Z_{ql} - z_{pq, pq} \quad (\text{II-7})$$

sendo $Z_{pp}, Z_{qp}, Z_{pq}, Z_{qq}$ - elementos da matriz de impedâncias nodais;

$z_{pq,pq}$ - impedância da ligação que está sendo removida.

Através da redução de Kron, pode-se eliminar a barra fictícia l e obter as novas impedâncias vistas pelas barras p e q , por:

$$Z'_{pp} = Z_{pp} - \frac{Z_{lp} Z_{pl}}{Z_{ll}} \quad (\text{II-8})$$

$$Z'_{qq} = Z_{qq} - \frac{Z_{lq} Z_{ql}}{Z_{ll}} \quad (\text{II-9})$$

3.2 - Linhas com Acoplamento Mútuo

No caso de remoção de ligações com acoplamento mútuo, pode-se realizar de forma análoga a anterior, levando em conta agora os acoplamentos entre as linhas.

A figura II.3 mostra a condição de inserção de uma ligação, considerando as ligações pq e rs acopladas magneticamente.

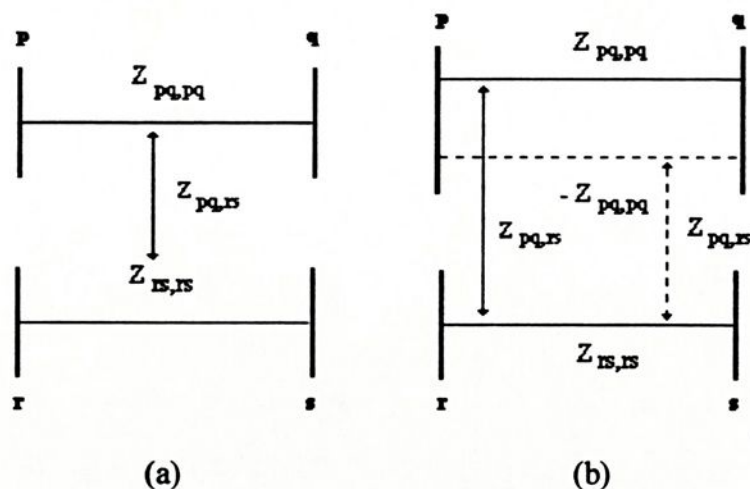


Figura II.3 (a) - Antes da introdução da nova ligação pq ;

(b) - Depois da adição da nova ligação pq .

A representação matricial da situação em enfoque, considerando os elementos relativos a barra fictícia **l**, é dada por:

$$Z_{pl} = Z_{lp} = Z_{pp} - Z_{qp} + \frac{y_{pq,rs} (Z_{rp} - Z_{sp})}{y_{pq,pq}} \quad (\text{II-10})$$

$$Z_{rl} = Z_{lr} = Z_{pr} - Z_{qr} + \frac{y_{pq,rs} (Z_{rp} - Z_{sr})}{y_{pq,pq}} \quad (\text{II-11})$$

$$Z_{ql} = Z_{lq} = Z_{pq} - Z_{qq} + \frac{y_{pq,rs} (Z_{rq} - Z_{sp})}{y_{pq,pq}} \quad (\text{II-12})$$

$$Z_{sl} = Z_{ls} = Z_{ps} - Z_{qs} + \frac{y_{pq,rs} (Z_{rs} - Z_{ss})}{y_{pq,pq}} \quad (\text{II-13})$$

$$Z_{ll} = Z_{pl} - Z_{ql} + \frac{1 + y_{pq,rs} (Z_{rl} - Z_{sl})}{y_{pq,pq}} \quad (\text{II-14})$$

Através da inversão de matrizes pode-se calcular o valor dos elementos $y_{pq,rs}$ e $y_{pq,pq}$ da matriz de admitâncias primitivas.

$$\begin{bmatrix} y_{\text{primitiva}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{\text{primitiva}} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} z_{pq,pq} & z_{pq,rs} \\ z_{rs,pq} & z_{rs,rs} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} y_{pq,pq} & y_{pq,rs} \\ y_{rs,pq} & y_{rs,rs} \end{bmatrix}$$

Obtém-se as novas impedâncias vistas pelas barras, após eliminar a barra fictícia **l**, com a redução de Kron. São elas:



$$Z'_{pp} = Z_{pp} - \frac{Z_{lp} Z_{pl}}{Z_{ll}} \quad (\text{II-15})$$

$$Z'_{qq} = Z_{qq} - \frac{Z_{lq} Z_{ql}}{Z_{ll}} \quad (\text{II-16})$$

$$Z'_{rr} = Z_{rr} - \frac{Z_{lr} Z_{rl}}{Z_{ll}} \quad (\text{II-17})$$

$$Z'_{ss} = Z_{ss} - \frac{Z_{ls} Z_{sl}}{Z_{ll}} \quad (\text{II-18})$$

3.3 - Etapas do Procedimento de Abertura de Linhas

Considere-se que uma linha genérica **pq** da rede em estudo esteja sendo processada, assim tem-se as etapas do procedimento de abertura de linhas, como segue:

- 1 - Extraí-se da matriz de impedâncias nodais de seqüência positiva ou zero os elementos afetados pela remoção da linha **pq**;
- 2 - Calcula-se os elementos da linha e coluna fictícia **l**, para a seqüência positiva ou zero, com as equações (II-5), (II-6) e (II-7);
- 3 - Calcula-se as novas impedâncias de seqüência positiva vistas pelas barras **p** e **q**, com as equações (II-8) e (II-9);
- 4 - Verifica-se a ligação **pq** está acoplada magneticamente. Em caso afirmativo seguir para a 5ª etapa. Caso contrário repetir as etapas 1, 2 e 3 para a seqüência zero;
- 5 - Monta-se, a matriz de impedâncias primitiva envolvendo as linhas que mantêm acoplamento mútuo com a linha **pq** e inverte-se a matriz formada nesta etapa;
- 6 - Calcula-se os elementos da linha e coluna fictícia **l**, com as equações (II-10), (II-11), (II-12), (II-13), (II-14);
- 7 - Calcula-se as novas impedâncias vistas pelas barras **p** e **q**, com as equações (II-15), (II-16), (II-17) e (II-18).



1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas noções gerais de estatística, como um auxílio à compreensão do trabalho.

No tratamento estatístico de correntes de curto-circuito, são utilizadas definições, noções e conceitos estatístico nem sempre corriqueiros. Assim são apresentadas definições de distribuição uniforme e gama, sendo a última empregada para interpretar de forma contínua as distribuições discretas de corrente obtidas experimentalmente.

Para caracterizar numericamente essas distribuições experimentais e possibilitar a determinação de parâmetros da distribuição gama, são apresentados os conceitos de medidas de posição e dispersão.

São apresentados ainda os conceitos de aderência, teste de aderência e nível de significância empregados para verificar se a distribuição gama interpola de forma aceitável a distribuição de correntes obtida, descrevendo-se então o método de Kolmogorov-Smirnov.

São utilizadas duas distribuições no desenvolvimento dos métodos, a distribuição uniforme no método indireto para obter a distribuição de correntes de curto-circuito ao longo das linhas onde consideram-se conhecidas as distribuições de correntes de defeito nas barras das subestações e as distribuições de comprimentos das linhas conectadas e no método direto a distribuição gama que a partir da determinação de correntes de curto-circuito das linhas faz-se o levantamento de distribuições de frequências de correntes para faltas nas linhas.

Na definição da distribuição gama, os seus parâmetros são obtidos em função da média e do desvio-padrão, assumindo-se a distribuição gama como sendo aquela que melhor explica os resultados das simulações.



2 - DISTRIBUIÇÃO UNIFORME

Supondo (x) variável aleatória contínua, no intervalo finito $\alpha \leq x \leq \beta$, dizemos que (x) é uniformemente distribuída sobre este intervalo, se a função de densidade de probabilidade for dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ 0, & \text{para qualquer outro valor} \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Para este caso, a função de distribuição $F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$ é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & x > \beta \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

O gráfico da função de distribuição de uma variável aleatória uniformemente distribuída está representado a seguir:

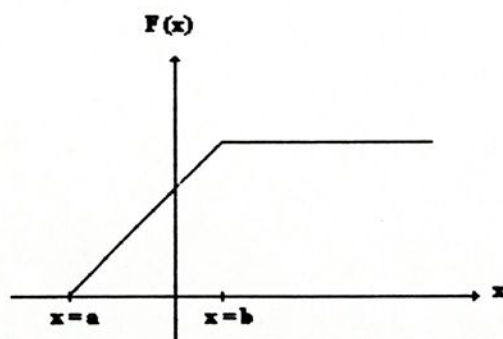


Figura III.1 - Gráfico da função de distribuição de uma variável aleatória uniformemente distribuída.

Para tal distribuição, a média (μ) e a variância (τ^2) da variável aleatória (x) podem ser obtidas, respectivamente, por:

$$\begin{cases} \mu = \frac{\alpha + \beta}{2} \\ \tau^2 = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12} \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

3 - DISTRIBUIÇÃO GAMA

Inicialmente define-se a função gama, denotada por (Γ) como sendo:

$$\Gamma(\alpha + 1) = \int_0^{+\infty} x^\alpha e^{-x} dx, \text{ definida para } \alpha > 0 \quad (\text{III-4})$$

Podemos integrar por partes a equação (III-4) e demonstrar que:

$$\Gamma(\alpha + 1) = \alpha \Gamma(\alpha) \quad (\text{III-5})$$

Supondo agora que α seja um inteiro positivo e aplicando-se o resultado anterior repetidamente, obtemos:

$$\Gamma(\alpha + 1) = \alpha ! \quad (\text{III-6})$$

Por definição, seja uma variável aleatória contínua (x) com contradomínio $0 < x < \infty$. Diz-se que (x) tem uma distribuição gama, se sua função de densidade de probabilidade for dada pela seguinte igualdade:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^\alpha e^{-x/\beta}}{\Gamma(\alpha + 1)\beta^{\alpha + 1}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad \text{com } \alpha \text{ e } \beta > 0 \quad (\text{III-7})$$

sendo Γ a função gama.



Aplicando as equações anteriores, a função densidade de probabilidade da distribuição gama pode ser reescrita como:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^\alpha e^{-x/\beta}}{\alpha! \beta^{\alpha+1}} & , x > 0 \\ 0 & , x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

Na figura III.2 apresenta-se esta função densidade de probabilidade

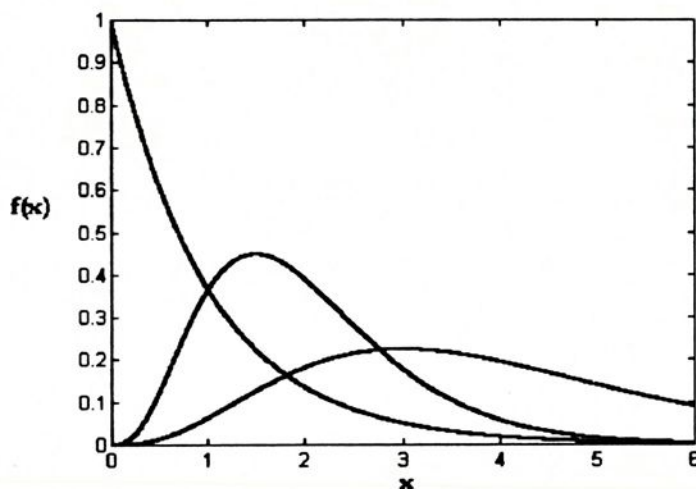


Figura III.2 - Gráfico da função de densidade gama para alguns valores de α e β .

Considerando a função densidade de probabilidade da variável aleatória (III-8), consequentemente a função de distribuição correspondente será dada por:

$$F(x) = 1 - P(X > x) = 1 - \int_x^\infty \frac{t^\alpha e^{-t/\beta}}{\alpha! \beta^{\alpha+1}} dt \quad (\text{III-9})$$

Para tal distribuição, a média (μ) e a variância (τ^2) da variável aleatória (x) podem ser obtidas, respectivamente, por:

$$\begin{cases} \mu = (\alpha + 1) \beta \\ \tau^2 = (\alpha + 1) \beta^2 \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

Resolvendo o sistema representado pelo conjunto de equações anteriores, obtém-se os parâmetros α e β em função da média (μ) e da variância (τ^2), são eles:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\mu^2}{\tau^2} - 1 \\ \beta = \frac{\tau^2}{\mu} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

Dispondo da média (μ) e da variância (τ^2) da distribuição levantada experimentalmente pode-se determinar os parâmetros α e β , definindo desta forma a função densidade de probabilidade gama.

O parâmetro α deverá ser aproximado por um inteiro, pois o mesmo será usado na forma fatorial na aplicação da função densidade de probabilidade da distribuição gama.

4 - A CIÊNCIA ESTATÍSTICA

A estatística é considerada como uma ciência que se preocupa com a organização, descrição, análise e interpretação de dados experimentais.

É evidente que tanto a parte de organização e descrição, como a de análise e interpretação são de extrema importância.

Pode-se considerar a estatística dividida basicamente em duas partes: a estatística descritiva, que se preocupa com a organização e descrição dos dados experimentais e a estatística indutiva com a análise e interpretação desses dados.

4.1 - A Estatística Descritiva

A estatística trabalha com informações referentes a conjuntos de elementos observados.

Normalmente esses elementos constituem uma amostra extraída de uma população que se deseja analisar, mas em muitos casos o conjunto observado pode ser constituído por uma população inteira, que é o caso a ser analisado neste trabalho.



É necessário e importante que se tenha definida quais as características de interesse a serem verificadas e tratando-se de uma amostra grande é difícil observar estas características, que seriam a média, variância, desvio-padrão, entre outras.

Uma distribuição que registre a frequência relativa ou porcentagem poderá ser considerada como uma distribuição de probabilidade, sendo que as probabilidades são substituídas pelas frequências relativas, podendo essas frequências serem encaradas como probabilidades empíricas, isto é desde que as mesmas sejam baseadas em experiências e não em estudos.

A estatística descritiva pode descrever os dados através de gráficos, distribuições de frequências ou de parâmetros associados a essa distribuição.

4.1.1- Descrição Gráfica

O primeiro passo para se descrever graficamente um conjunto de dados observados é verificar as frequências dos diversos valores existentes da variável.

Define-se frequência de um dado valor de uma variável como sendo o número de vezes que o valor foi observado. Assim sendo (f_i), a frequência do i -ésimo valor verificado e (n) o número total de elementos observados, tem-se:

$$\sum_{i=1}^k f_i = n \quad (\text{III-12})$$

sendo k = número de diferentes valores assumidos pela variável.

A associação das respectivas frequências a todos os diferentes valores observados define a distribuição de frequências do conjunto de valores observados.

Define-se frequência relativa como sendo o quociente de sua frequência pelo número total de elementos observados, ou seja:

$$f_i' = \frac{f_i}{n} \quad (\text{III-13})$$

sendo f_i' = frequência relativa.



Temos ainda que

$$\sum_{i=1}^k f'_i = 1 \quad (\text{III-14})$$

4.1.2 - Descrição Gráfica das Variáveis Quantitativas Contínuas - Classes de Frequências

No caso das variáveis quantitativas contínuas, a representação gráfica, não deverá ser feita por diagrama de barras, pois o mesmo não representará corretamente a distribuição de frequências, devido a natureza contínua da variável, e portanto a representação correta deverá associar a frequência ao intervalo no qual a ocorrência de valores compreendidos entre seus limites. Isso faz-se por meio de uma figura composta por retângulos cujas áreas representam as frequências dos intervalos existentes. Tal figura denomina-se histograma e os intervalos classes de frequências.

Para o caso de variáveis contínuas, as frequências serão associadas a intervalos de variação da variável e não a valores individuais. Tais intervalos ou classes de frequências serão representadas pelos seus pontos médios.

Para termos uma representação gráfica adequada dos dados, agrupamos as variáveis em classes de frequências. A frequência de cada classe será, então, igual à soma das frequências de todos os valores dentro da classe.

4.1.3 - Características Numéricas de uma Distribuição de Frequências

Além da descrição gráfica é necessário obter determinadas características das distribuições de frequência, denominadas de medidas da distribuição de frequências, pois as mesmas tentam quantificar alguns dos aspectos de maior interesse.

É apenas de nosso interesse, para os estudos em questão, conhecermos no momento as medidas de posição e de dispersão, que serviram para localizar as distribuições e caracterizar sua variabilidade.



4.1.3.1 - Medidas de Posição

As medidas de posição servem para localizar a distribuição de freqüências sobre o eixo de variação da variável em estudo. A média e a mediana, indicam, por critérios diferentes, o centro da distribuição de freqüências. Por isso, diz-se também que são medidas de tendência central.

4.1.3.1.1 - Média (Aritmética)

Considere x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) o conjunto de valores, pode-se definir sua média, por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{III-15})$$

Estando os valores agrupados em K pares, podemos obter $\bar{x}$ por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i f_i}{n} = \sum x_i f_i' \quad (\text{III-16})$$

sendo $f_i' =$ freqüência relativa.

4.1.3.1.2 - Mediana

A mediana é uma quantidade que procura caracterizar o centro da distribuição de freqüências. Calcula-se levando em conta a ordem dos valores que formam o conjunto de dados.

Define-se a mediana de um conjunto de (n) valores ordenados como sendo (n) ímpar, igual ao valor de ordem $\left(\frac{n+1}{2}\right)$ desse conjunto. Para (n) par, igual a qualquer valor situado entre o de ordem $\left(\frac{n}{2}\right)$ e o de ordem $\left(\left(\frac{n}{2}\right)+1\right)$. Por simplificação, considere a mediana como o valor médio entre os valores de ordens indicadas do conjunto de dados.



Considerando, uma distribuição em classes de freqüências, pode-se calcular um valor para a sua mediana por:

$$md = li + \frac{\left(\frac{n}{2}\right) - F_a}{f_{md}} a_{md} \quad (\text{III-17})$$

sendo:

- li - limite inferior da classe que contém a mediana;
- n - número de elementos do conjunto fornecido;
- F_a - soma das freqüências das classes anteriores à que contém a mediana;
- f_{md} - freqüência da classe que contém a mediana;
- a_{md} - amplitude da classe que contém a mediana.

4.1.3.1.3 - Quartis

O valor médio que divide o conjunto em duas partes iguais é a mediana. Por analogia com este conceito, pode-se pensar em valores que dividem o conjunto em quatro partes iguais. Os valores assim definidos e representados por Q_1 , Q_2 e Q_3 denominam-se primeiro, segundo e terceiro quartis, respectivamente.

$$Q_i = V + \left[\frac{i\left(\frac{N}{4}\right) - S}{n} \right] a \quad (\text{III-18})$$

sendo:

- i - número do quartil desejado, isto é, $i \in \{1, 2, 3\}$;
- N - número total de valores observados;
- a - amplitude da classe;
- S - somatória do número de valores observados em cada uma das classes até o limite que não supere o valor $[i(N/4)]$;
- n - número de valores observados na classe seguinte àquela definida por S;
- V - valor ocorrido para a classe definida por S.



4.1.3.2 - Medidas de Dispersão

A informação fornecida pelas medidas de posição necessita ser complementada pelas medidas de dispersão. Estas servem para mostrar o quanto os dados encontram-se dispersos em torno da região central. Caracterizam o grau de variação no conjunto de valores. As medidas de dispersão que nos interessam agora são a variância e o desvio-padrão.

4.1.3.2.1 - Variância (τ^2)

Define-se, variância de um conjunto de dados, a média dos quadrados das diferenças dos valores em relação à sua média, isto é:

$$\tau^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (\text{III-19})$$

Observando que:

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}$$

Resulta:

$$\tau^2 = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2}{n} - \bar{x}^2 \quad (\text{III-20})$$

Estando os dados dispostos em uma tabela de frequência composta por (k) situações agrupadas, tem-se:

$$\tau^2 = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 f_i}{n} - \bar{x}^2 \quad (\text{III-21})$$

4.1.3.2.2 - Desvio-Padrão (σ)

Define-se desvio-padrão como a raiz quadrada positiva da variância. A vantagem do desvio-padrão sobre a variância é que o primeiro é expresso na mesma unidade da variável. Logo:

$$\sigma = \sqrt{\tau^2} \quad (\text{III-22})$$

4.2 - A ESTATÍSTICA INDUTIVA

O objetivo da estatística indutiva é tirar conclusões sobre populações tomando como referências os resultados observados em amostras retiradas dessas populações.

Esta parte da estatística trabalha com processo de indução, que é um processo de raciocínio, que partindo do conhecimento de uma parte, procura-se tirar conclusões sobre a realidade, no todo.

Pode-se perceber que um processo de indução pode as vezes não ser exato, pois quando induz-se, fica-se sempre sujeito a erros. Portanto a finalidade da estatística indutiva é informar até que ponto pode-se estar errando nas induções e com que probabilidade.

Os problemas da estatística indutiva podem ser considerados divididos em dois grupos: Estimação de Parâmetros e Teste de Hipóteses.

4.2.1- Estimação de Parâmetros

O cálculo de probabilidades fornece diversos modelos de distribuições teóricas, tais como as distribuições binomial, de Poisson, normal, etc. Esses modelos, em verdade, representam, famílias de distribuição que dependem de um ou mais parâmetros básicos. Assim, quando descreve-se uma população estatística, faz-se isso através de algum modelo teórico de distribuição de probabilidades, cujos parâmetros devem ser estimados da melhor forma possível com base nos resultados amostrais.



Claramente, a tarefa de especificação da forma da distribuição da população pode ser orientada pela conveniente representação gráfica dos dados da amostra disponível. Por outro lado, existem testes que permitem avaliar a representatividade do modelo teórico proposto para uma certa população.

Um problema freqüentemente enfrentado, surge quando se desconhece o parâmetro populacional. Deve-se estimá-lo fazendo necessário o uso da evidência experimental. Esse problema pode ser resolvido conhecendo a distribuição de probabilidade da variável.

Assim, supõe-se que os valores da população se distribuam conforme um determinado modelo de distribuição de probabilidades, cujos parâmetros são desconhecidos e precisam ser estimados.

Pode-se proceder a estimação de parâmetros por ponto e por intervalo. No primeiro caso, procede-se à estimativa do parâmetro populacional através de um único valor estimado. No segundo caso, constrói-se um intervalo que deverá conter, com probabilidade conhecida, o parâmetro.

4.2.2 - Testes de Hipóteses

Ao contrário do que ocorre nos problemas de estimação, suponha que exista uma hipótese sobre um determinado parâmetro da população e que será considerada válida até prova em contrário. Essa hipótese é testada baseando-se nos resultados amostrais, sendo aceita ou rejeitada.

Os testes de hipóteses ou de significância são processos que possibilitam decidir sobre a aceitação ou rejeição das hipóteses, ou determinar se a amostra observada difere de modo significativo dos resultados esperados.

Uma hipótese que é rejeitada quando deveria ser aceita, diz-se que foi cometido um erro tipo I. Se ao contrário, for aceita uma hipótese que deveria ser rejeitada, diz-se que foi cometido um erro tipo II.

Chamando de H_0 a hipótese existente e de H_1 a hipótese alternativa, o resultado do teste de aplicação de ocorrência fornecerá em termos gerais a tabela III.1, onde aparecem os dois tipos de erros que podem ocorrer.



Tabela III.1 - Possíveis resultados de um teste de hipóteses e suas probabilidades condicionadas à realidade.

		REALIDADE	
		Ho Verdadeira	Ho Falsa
DECISÃO	Aceitar H_0	Decisão Correta ($1 - \varphi$)	Erro Tipo II (ξ)
	Rejeitar H_0	Erro Tipo I (φ)	Decisão Correta ($1 - \xi$)

sendo:

erro do tipo I: rejeitar H_0 , sendo H_0 verdadeira;

erro do tipo II: aceitar H_0 , sendo H_0 falsa.

O nível de significância do teste é feito quando testa-se uma hipótese estabelecida, a probabilidade máxima com a qual se sujeitaria a correr o risco de um erro do tipo I. As probabilidades dos tipos de erro I e II são designadas por (φ) e (ξ), respectivamente.

A região crítica do teste é formada pela faixa de valores da variável de teste que leva à rejeição de H_0 . A faixa restante é a região de aceitação.

Pode-se fixar a região crítica do teste e determinar a probabilidade (φ) com base na distribuição, ou pode-se fornecer (φ) e obter a região crítica. Esses segundo procedimento ocorre com maior frequência, sendo $\varphi = 5\%$ e $\varphi = 1\%$ os valores usualmente empregados.

Conhecida uma distribuição amostral, a figura III.3 ilustra os conceitos de região crítica e região de aceitação para um dado nível de significância adotado.

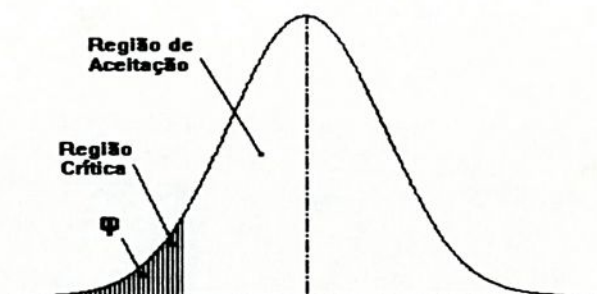


Figura III.3 - Região de aceitação e crítica para um nível de significância.

Em um teste de hipótese, adotando-se um nível de significância 0,01, existem cerca de 1 probabilidade em 100 da hipótese ser rejeitada, quando deveria ser aceita. Nesse caso, diz-se que a hipótese é rejeitada no nível de significância 0,01, o que significa que a probabilidade de erro seria de 0,01.

Para obtermos testes de significância bons, devemos planejá-los de modo que os erros de decisão sejam reduzidos ao máximo.

5 - TESTES NÃO-PARAMÉTRICOS

Os testes paramétricos, podem testar hipóteses referentes a um parâmetro populacional ou à comparação de dois parâmetros.

Os testes não-paramétricos, se referem a outros aspectos e não aos parâmetros, podendo ser úteis em diversos casos e também empregados como alternativa a algum teste paramétrico.

5.1 - Testes de Aderência

Os testes de aderência constituem a classe de testes não-paramétricos, em que a hipótese testada tem como referência a forma da distribuição da população.

Nesse teste, por hipótese, admite-se que a distribuição da variável de interesse na população possa ser descrita por um modelo de distribuição de probabilidade e testa-se o modelo, ou seja, verifica-se da boa ou má aderência dos dados da amostra ao modelo. Obtendo-se uma boa aderência e a amostra sendo razoavelmente grande, pode-se admitir que o modelo representa adequadamente a distribuição populacional. Assim, a rejeição da hipótese (H_0) em um dado nível de significância indica que o modelo testado não é adequado para representar a distribuição populacional.



5.1.1 - Método de Kolmogorov - Smirnov

É um método desenvolvido por Kolmogorov e Smirnov, sendo em geral um dos métodos de maior efeito para o teste de aderência, onde a variável de teste é a maior diferença observada entre a função de distribuição acumulada do modelo e da amostra.

A função de distribuição acumulada do modelo testado, ou função de repartição, fornece as probabilidades acumuladas em cada ponto, isto é, $F(x) = P(X \leq x)$.

A função de distribuição acumulada da amostra corresponderá ao gráfico das frequências relativas acumuladas. Designando-se essa segunda função por $G(x)$, o teste é simplesmente a verificação do valor

$$d = \max |F(x) - G(x)| \quad (\text{III-23})$$

e a comparação com um valor crítico tabelado em função de (φ) e (n) . Se (d) for maior que o valor crítico, rejeita-se a hipótese (H_0) .

Sendo $n > 50$, pode-se calcular os valores críticos, para $\varphi = 5\%$ e $\varphi = 1\%$, respectivamente, por:

$$\frac{1,36}{\sqrt{n}} \text{ e } \frac{1,63}{\sqrt{n}} \quad (\text{III-24})$$

sendo n - número de valores observados que formam a distribuição.



1 - INTRODUÇÃO

As metodologias propostas para o levantamento das distribuições de correntes de curto-circuito denominam-se métodos direto e indireto. Estes métodos foram desenvolvidos em [02] e [03] considerando a falta alimentada apenas por um dos extremos da linha, estando o outro extremo aberto através de seu correspondente disjuntor.

Neste trabalho, o método direto foi desenvolvido considerando a inserção de uma barra auxiliar em todos os possíveis pontos de falta e o método indireto implementado para falta monofásica, uma vez que já o foi, em [02] e [03], para falta trifásica isolada e bifásica isolada.

Nos dois métodos propostos, examinam-se apenas o valor eficaz da componente simétrica das correntes. A componente unidirecional não é obtida, fornecendo-se para ela a distribuição de constante de tempo correspondente a todos os pontos de defeitos examinados.

2 - MÉTODO DIRETO

Considera-se um número finito de pontos de defeito em cada uma das distribuições de correntes de curto-circuito a serem determinadas. Este número é fixado com base no comprimento das linhas, supondo que a falta ocorra a partir de um dos extremos, em posições de ocorrências sucessivas, distantes entre si de 1(um) quilômetro.

Apresenta-se o método direto com a abertura de linhas e com a inserção de barra, visando estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos através das metodologias desenvolvidas em [02] e [03] e neste trabalho.



2.1 - Critérios de Classificação

2.1.1 - Correntes de Curto-Circuito

Os valores das correntes de curto-circuito correspondentes a cada linha serão agrupados em uma determinada classe, sendo esta definida pelo valor da corrente de falta apresentada pela barra que alimenta a linha sendo processada.

Classe 1 - $I_{cc} \leq 20,0 \text{ kA}$

Classe 2 - $20,0 < I_{cc} \leq 31,5 \text{ kA}$

Classe 3 - $31,5 < I_{cc} \leq 40,0 \text{ kA}$

2.1.2 - Constantes de Tempo

No levantamento da distribuição de constantes de tempo, os valores obtidos serão agrupados para todos os pontos examinados, segundo o nível de tensão examinado.

2.2 - Método Direto com Abertura de Linhas

Este método foi inicialmente desenvolvido em [02] e [03], onde calcula-se as correntes de curto-circuito para todos os possíveis pontos ao longo do comprimento das linhas, definidos por posições sucessivas separadas entre si por uma distância constante. Assume-se que um dos extremos da ligação encontra-se aberto. Para isto elimina-se a ligação entre as barras e a partir de uma delas vai-se incrementando o valor de sua impedância vista pela barra de alimentação com o valor de impedância correspondente à distância entre a subestação e o ponto de falta.

2.3 - Método Direto com Inserção de Barra

O objetivo do método proposto neste trabalho é o cálculo das correntes de defeito ao longo do comprimento das linhas sem a abertura das mesmas.

Neste método, calcula-se as correntes de curto-circuito ao longo do comprimento das linhas com a técnica de inserção de barra, definindo todos os possíveis pontos de falta, através do incremento unitário da variável d (distância da localização da falta).



2.3.1 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Correntes de Curto-Circuito ao Longo das Linhas

Sendo conhecidas as matrizes de impedâncias nodais de seqüência positiva e zero da rede, as impedâncias próprias de seqüência positiva e zero de todas as linhas, as impedâncias mútuas de seqüência zero de todas as ligações paralelas da rede e, adotando-se o teorema de Thévenin com as hipóteses simplificadoras habituais é possível estabelecer as etapas de um procedimento para a obtenção de distribuição de correntes de defeito ao longo do comprimento das linhas para o tipo de falta considerado.

Consideremos uma linha genérica **pq**, do arquivo de dados de ligações, da rede analisada que esteja sendo processada.

- Extraem-se das matrizes de impedâncias nodais de seqüência positiva e zero os elementos afetados pela alteração da rede provocada pela inserção da barra auxiliar.
- Calcula-se as correntes de curto-circuito monofásico e trifásico junto à barra processada antes da inserção, com as seguintes equações:

MONOFÁSICO

$$i = \frac{1.1 V_p}{(2 Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0) / 3} \quad (\text{p.u}) \quad (\text{IV-1})$$

TRIFÁSICO

$$i = \frac{1.1 V_p}{Z_{pp}^1} \quad (\text{p.u}) \quad (\text{IV-2})$$

sendo:

V_p - tensão nominal de fase da barra p, antes da falta;

Z_{pp}^1 - impedância de seqüência positiva vista da barra p;

Z_{pp}^0 - impedância de seqüência zero vista da barra p.



- Compara-se o valor de corrente obtido na etapa anterior com os limites definidos para as classes, determinando a classe do disjuntor.

- Calcula-se as correntes de curto-circuito monofásico e trifásico ao longo do comprimento da linha **pq**, usando-se a técnica de inserção de barra e assumindo-se que a falta ocorra na linha **pq** numa localização **m** entre as barras **p** e **q** a uma distância λL_{pq} da barra **p**, sendo $0 < \lambda < 1$ e L_{pq} o comprimento total da linha.

Os elementos da matriz impedância de barra Z^b incluindo a barra **m** são dados por:

$$Z_{mr}^b = (1 - \lambda)Z_{pr} + \lambda Z_{qr} \quad (\text{IV-3})$$

$$Z_{mm}^b = (1 - \lambda)^2 Z_{pp} + \lambda^2 Z_{qq} + 2\lambda(1 - \lambda)Z_{pq} + \lambda(1 - \lambda)Z_{pq} \quad (\text{IV-4})$$

sendo os elementos genéricos Z_{ij} oriundos da matriz de impedâncias nodal original e z_{pq} a impedância da ligação **pq**, com r variando de 1 até o número de barras da matriz Z original.

- Nestas condições as correntes calculadas nos pontos onde será inserida a barra fictícia **m** podem ser determinadas por:

MONOFÁSICO

$$i = \frac{1.1 V_p}{(2 Z_{mm}^{b\ 1} + Z_{mm}^{b\ 0}) / 3} \quad (\text{p.u.}) \quad (\text{IV-5})$$

TRIFÁSICO

$$i = \frac{1.1 V_p}{Z_{mm}^{b\ 1}} \quad (\text{p.u.}) \quad (\text{IV-6})$$

sendo:

$Z_{mm}^{b\ 1}$ - impedância de barra Z^b de seqüência positiva;

$Z_{mm}^{b\ 0}$ - impedância de barra Z^b de seqüência zero.

- Para cada valor obtido na respectiva classe, procede-se como segue:

- Acumula-se um ponto em um contador de pontos da classe definido pelo tipo de falta e classe de corrente do disjuntor;

- Acumula-se um ponto em um contador de valores de corrente correspondente ao valor obtido, definido pelo tipo de falta e classe de corrente do disjuntor, cujo indexador é o valor de corrente de curto-circuito arredondado.

- Retém-se para a classe e tipo de falta o máximo valor de corrente observado.

- Incrementa-se o valor da distância d em uma unidade, definindo novo ponto de falta e repete-se o procedimento até que a variável d assuma o valor do comprimento da linha pq .

- Incrementa-se o indexador do arquivo de dados das ligações, definindo uma nova linha pq e retorna-se a etapa inicial.

2.3.2 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Constantes de Tempo

Estas etapas são apresentadas separadamente, mas podem ser incorporadas às apresentadas anteriormente.

Em cada ponto examinado ao longo do comprimento das linhas, são conhecidas a resistência e a reatância indutiva. Segue assim as etapas para obtenção da distribuição de constantes de tempo.

- Calcula-se a constante de tempo τ , com a seguinte expressão:

$$\tau = \frac{x_1}{377r} \quad (IV-7)$$

sendo:

x_1 - reatância de sequência positiva no ponto considerado;

r - resistência de sequência positiva no ponto considerado.

- Acumula-se um ponto em um contador de pontos definidos para o nível de tensão.

- Acumula-se um ponto em um contador de valores de constante de tempo correspondentes ao valor determinado aproximado por um inteiro.



3 - MÉTODO INDIRETO

O método indireto foi desenvolvido em [02] e [03], para as faltas trifásicas isoladas e bifásicas isolada e esta formulação foi implementada neste trabalho para o curto-circuito fase-terra.

Assume-se, uma distribuição uniforme de probabilidade de defeito ao longo das linhas e admite-se a independência entre as correntes de faltas nas barras e os comprimentos das linhas a elas ligadas.

Pode-se obter a distribuição de correntes de curto-circuito ao longo do comprimento das linhas considerando conhecidas as distribuições de correntes de defeito nas barras das subestações e as distribuições de comprimentos das linhas conectadas.

3.1 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Correntes de Curto-Circuito nas Barras

A distribuição de correntes de faltas nas barras é obtida de duas maneiras:

1. Para cada uma das barras da rede são executados quantos cálculos da corrente de curto-circuito forem necessários, eliminando-se em cada um deles uma das linhas diretamente ligadas às barras. Para cada valor de corrente obtido aproximado por um inteiro, atribui-se acumulativamente peso unitário;
2. Para cada uma das barras da rede calcula-se a corrente de curto-circuito para defeito nas barras, atribuindo-se a cada valor de corrente encontrado um peso igual ao número de linhas ligadas ao nó.



Procedimento A

- Extraí-se da matriz de impedâncias nodais de sequência positiva e zero os elementos afetados pela alteração na rede, provocada pela remoção da linha **pq**.
- Calcula-se a corrente de curto-circuito monofásico junto à barra **p**, com a seguinte expressão:

$$i = \frac{1.1 V_p}{(2 Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0)/3} \quad (\text{p.u.}) \quad (\text{IV-8})$$

sendo:

V_p - tensão nominal de fase da barra **p**, antes da falta;

Z_{pp}^1 - impedância de sequência positiva vista da barra **p**;

Z_{pp}^0 - impedância de sequência zero vista da barra **p**.

- Armazena-se as informações relativas ao tipo de falta da seguinte forma:
 - Acumula-se peso unitário em um contador de pesos;
 - Acumula-se peso unitário em um contador de valores de correntes observados, indexado pelo valor obtido.
- Usando-se a técnica de remoção de ligações entre as barras existentes **p** e **q**, calcula-se os novos elementos vistos por estas barras.
- Com estes novos elementos calcula-se a corrente através da expressão anterior e volta-se a acumular peso unitário ao novo valor encontrado.
- Incrementa-se o indexador do arquivo de dados de ligações e barras.

Procedimento B

- Extraí-se das matrizes de impedância nodais de sequência positiva e zero, os valores das impedâncias de sequência positiva e zero da barra **p**.



• Calcula-se a corrente de curto-circuito monofásico junto à barra **p**, com a seguinte expressão:

$$i = \frac{1.1 V_p}{(2 Z_{pp}^1 + Z_{pp}^0) / 3} \quad (\text{p.u}) \quad (\text{IV-9})$$

sendo:

V_p - tensão nominal de fase da barra **p**, antes da falta;

Z_{pp}^1 - impedância de seqüência positiva vista da barra **p**;

Z_{pp}^0 - impedância de seqüência zero vista da barra **p**.

• Armazena-se as informações levantadas da seguinte forma:

- Acumula-se o número de linhas diretamente ligadas à barra **p** em um contador de pesos;

- Acumula-se o número de linhas ligadas à barra **p** ao contador de valores de correntes correspondente ao valor calculado (aproximado por um inteiro).

• Incrementa-se o indexador do arquivo de dados de barra, definindo uma nova barra **p** da rede examinada e retorna-se às etapas iniciais.

3.2 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Comprimentos de Linhas

A obtenção de distribuições de freqüências relativas de comprimentos de linhas pode ser realizada considerando as mesmas classes estabelecidas para as correntes, isto é, agrupando-se os comprimentos em uma das três classes conforme o valor de corrente de curto-circuito monofásico apresentado junto à subestação de alimentação de cada uma das linhas.

Similarmente aos procedimentos já apresentados anteriormente, com as etapas abaixo obtém-se distribuições de freqüências relativas de comprimento de linhas.

• Extrai-se da matriz de impedância nodais de seqüência positiva e zero as impedâncias de seqüência positiva e zero.



- Calcula-se a corrente de curto-circuito monofásico junto à barra **p**.
- Compara-se o valor da corrente obtida com os limites estabelecidos para as classes de correntes, definindo desta forma a classe para o comprimento das linhas ligadas à barra **p**.
- Procura-se no arquivo de dados de ligações por uma linha **pq**.
- Executa-se o armazenamento de informações relativas à distribuição de frequência conforme segue:
 - Acumula-se um ponto em um contador do número de linhas definido para a classe;
 - Acumula-se um ponto em um contador de comprimentos, indexado pelo valor de comprimento definido pela classe.
- Incrementa-se o indexador do arquivo de dados de ligações e barras e retorna-se as etapas iniciais.

3.3 - Etapas de Obtenção da Distribuição de Correntes de Faltas nas Linhas

- Define-se a variável $i_{\text{pré-fix}}$ variando de 1 a 40 KA e a variável **I** como sendo $I = i_{\text{pré-fix}} + \Delta I$ e $\Delta I = 1 \text{ KA}$;
- Fixada a corrente **I** de falta na barra de alimentação, pode-se calcular, para cada valor de corrente de defeito **i** ao longo da linha, a distância d_o entre a posição da falta e a barra de alimentação, pela seguinte equação:

$$d_o = \frac{1}{ac} \left[\frac{h}{i_{\text{pré-fix}}} - \frac{1}{I} \right] \quad (\text{IV-10})$$

sendo: **a** e **h** - coeficientes que dependem do tipo de defeito examinado. Sendo $h = 1$,

$$a = \left[2 + \frac{z^0}{z^1} \right] / 3, \text{ para falta fase-terra e } c = z^1 / V;$$



z^1 - impedância de seqüência positiva da linha por unidade de comprimento;

z^0 - impedância de seqüência zero da linha por unidade de comprimento;

V - tensão de fase no nó de alimentação da linha.

• Definida a distância d_0 , o comprimento D da linha fica dividido em duas partes:

A primeira somatória é feita sobre as freqüências dos comprimentos até d_0 :

$$\sum_{D \leq d_0} f_D(D) \Delta D \quad (\text{IV-11})$$

A segunda somatória é estendida a partir de d_0 até o comprimento máximo, com os comprimentos obtidos por $D = d_0 + \Delta D$, sendo $\Delta D = 3 \text{ Km}$, como é mostrada a seguir

$$d_0 \sum_{D > d_0} \frac{f_D(D)}{D} \Delta D \quad (\text{IV-12})$$

• Dispondo-se da distribuição de correntes de falta nas barras $f_I(I)$ e da distribuição de comprimentos de linhas $f_D(D)$, determina-se a função $F_J(i)$, que é a função de repartição da variável casual J , fazendo i assumir valores compreendidos entre os extremos das classes de corrente, 1 a 40 kA, a correspondente forma discreta é dada pela seguinte expressão:

$$P\{J > i\} = 1 - F_J(i) = \sum_{I_k > i} \left[\sum_{D_k \leq d_0} f_D(D_k) \Delta D_k + d_0 \sum_{D_k > d_0} \frac{f_D(D_k)}{D} \Delta D_k \right] f_I(I) \Delta I_k \quad (\text{IV-13})$$

sendo:

$F_J(i)$ - função de repartição da variável casual J .

k - intervalo para o qual as desigualdades se verificam, ficando definido a partir de valor assumido por i .

1 - CONSIDERAÇÕES

O sistema Sul / Sudeste reduzido às barras fronteiriças da rede de 440 kV do sistema CESP, mostrado na figura V.1, foi utilizado com o intuito de ilustrar e colher resultados com a aplicação dos métodos.

Os resultados obtidos com a aplicação dos métodos implementados são apresentados e analisados a seguir.

Algumas providências foram tomadas com a finalidade de adequar e padronizar os resultados:

- As classes de correntes devem ser discretizadas em intervalos de 1 kA de amplitude e, para cada intervalo, deverão ser determinadas as frequências relativas de correntes de curto-circuito;

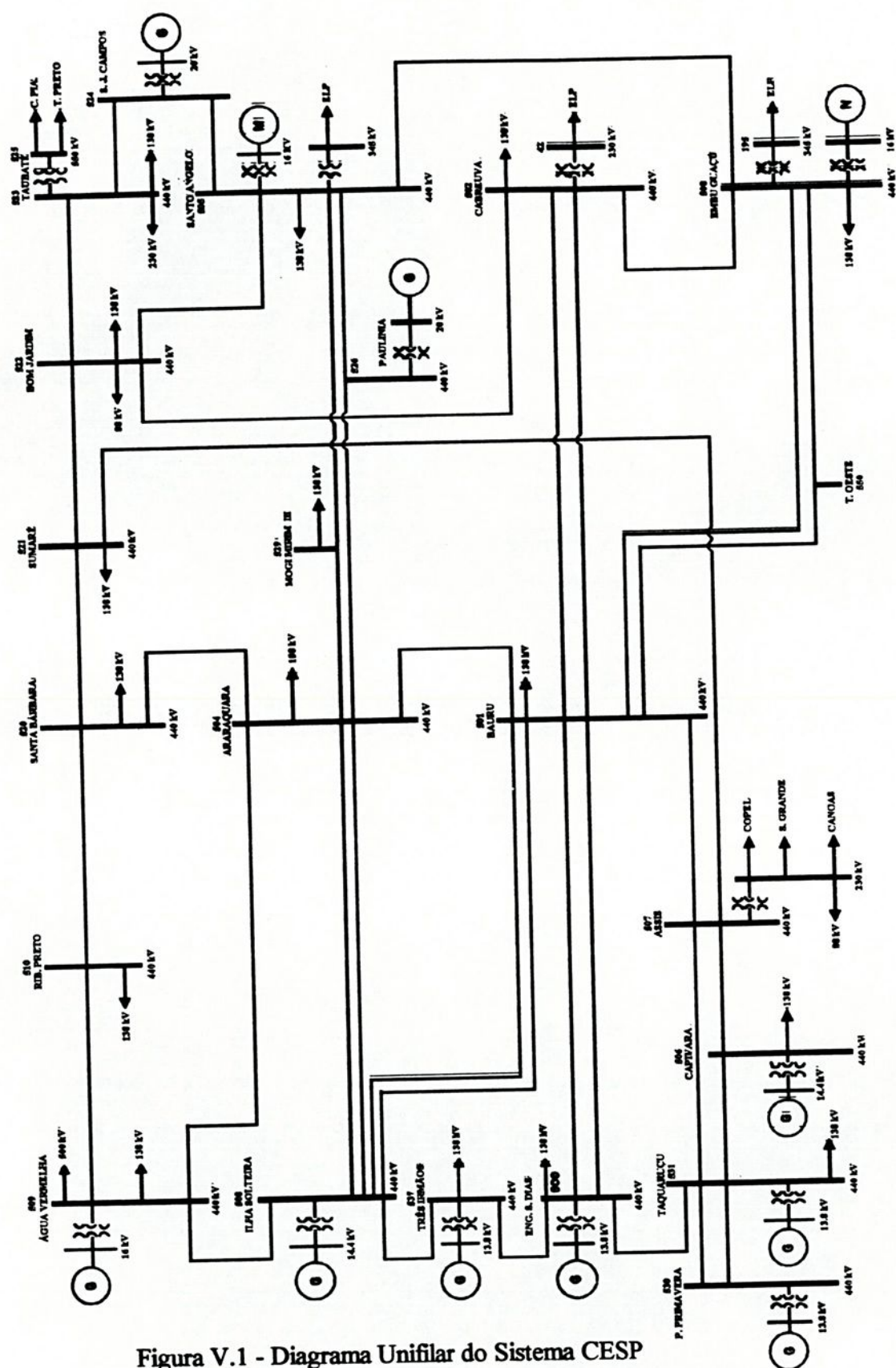
- No caso dos agrupamentos de constante de tempo (L / R), foi adotado procedimento análogo ao das correntes, sendo a amplitude dos intervalos fixada em 0,001 s;

- Com relação aos comprimentos (D), adotou-se também o procedimento análogo ao das correntes, assumindo-se a amplitude dos intervalos como sendo igual a 3 km.

As frequências relativas de correntes de curto-circuito são apresentadas em forma de histogramas e foram calculadas relativamente ao número total de pontos da classe.

As frequências relativas de comprimentos foram obtidas com relação ao número total de linhas em cada classe.





2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Com método direto obteve-se as figura de V.2 a V.21. As figuras V.2, V.3 e V.4 representam os curtos-circuitos trifásicos , as figuras V.5, V.6 e V.7 representam os curtos-circuitos bifásicos e as figuras V.8, V.9, V.10 e V.11 representam os curtos-circuitos monofásicos para a condição de abertura de linhas. Considerando a inserção de barra obteve-se as figuras V.12, V.13 e V.14 para os curtos-circuitos trifásicos, as figuras V.15, V.16 e V.17 para os curtos-circuitos bifásicos e as figuras V.18, V.19, V.20 e V.21 para os curtos-circuitos monofásicos.

Os parâmetros característicos destas distribuições são apresentados na tabela V.1. Dentre os parâmetros estão média, mediana, desvio-padrão, terceiro quartil e o número de pontos observados.

Os valores de constantes de tempo são mostrados na tabela V.2.

Na determinação do método indireto levanta-se as distribuições de frequência de correntes de curto-circuito nas barras e as de comprimentos de linhas. As distribuições de frequência de correntes de curto-circuito nas barras obtidas através dos procedimentos A e B, encontram-se representados nas figura V.22 a V.27, enquanto que a distribuição dos comprimentos das linhas, são mostradas nas figuras V.28, V.29 e V.30. Os parâmetros característicos podem ser encontrados na tabela V.3.

A partir das distribuições mencionadas acima, chega-se às distribuições de frequência de correntes de curto-circuito nas linhas da rede de 440 kV do sistema CESP. Estas por sua vez encontram-se representadas, na forma contínua e discreta, nas figuras V.31 a V.36, para os dois procedimentos de obtenção das correntes de falta nas barras.



Trifásico com Abertura de Linhas - Classe 1

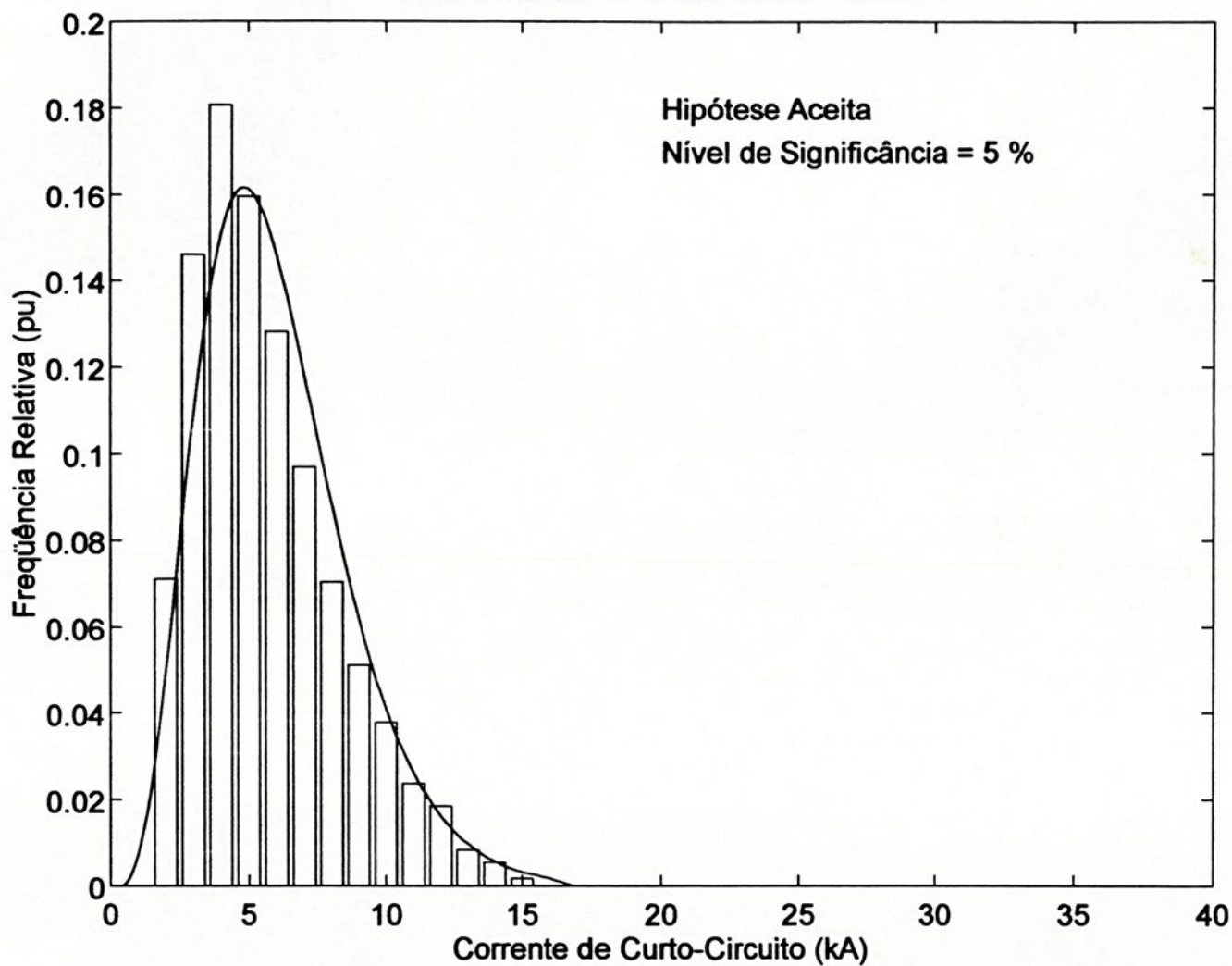


Figura V.2 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Trifásicos nas Linhas Classe 1

Trifásico com Abertura de Linhas - Classe 2

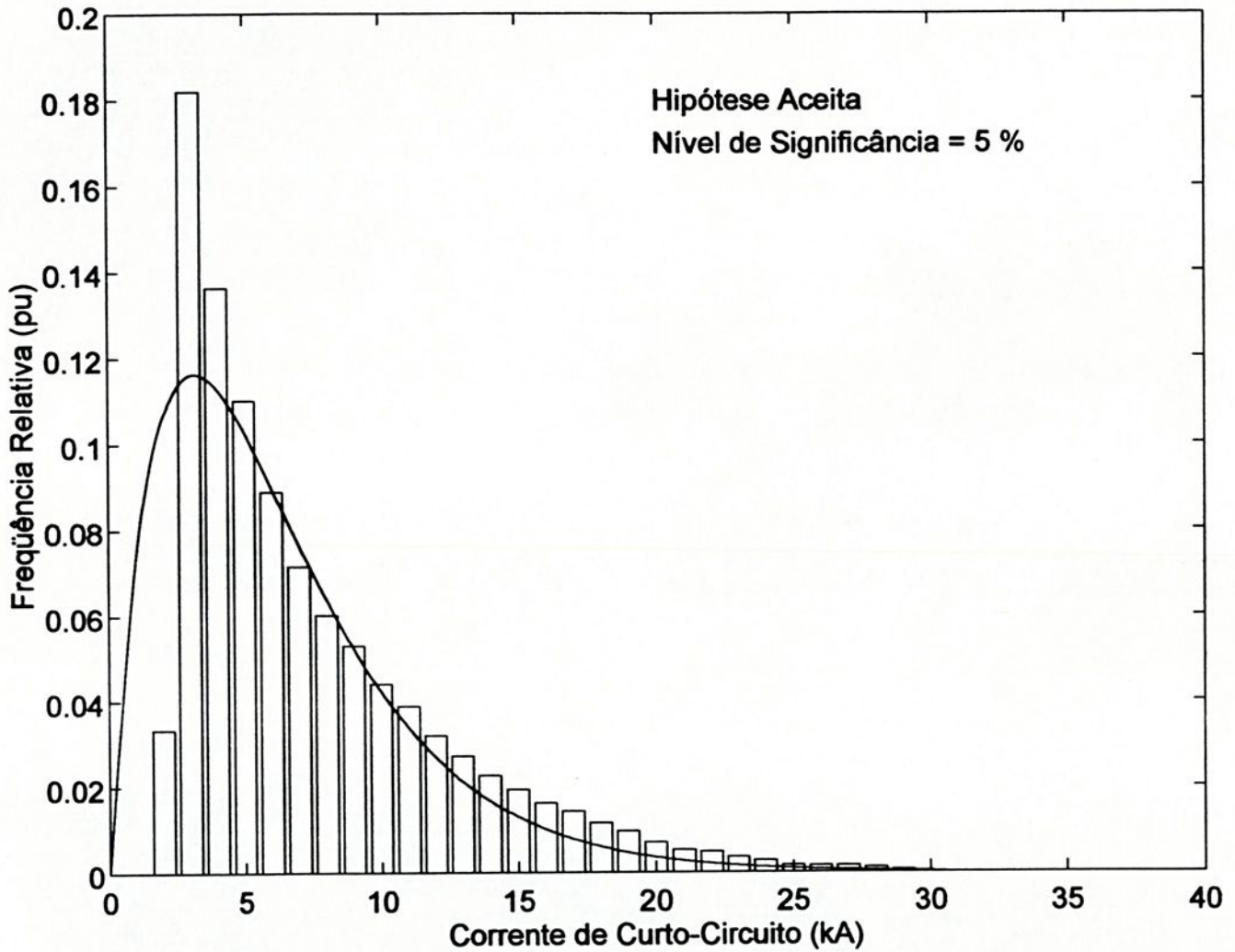


Figura V.3 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Trifásicos nas Linhas Classe 2

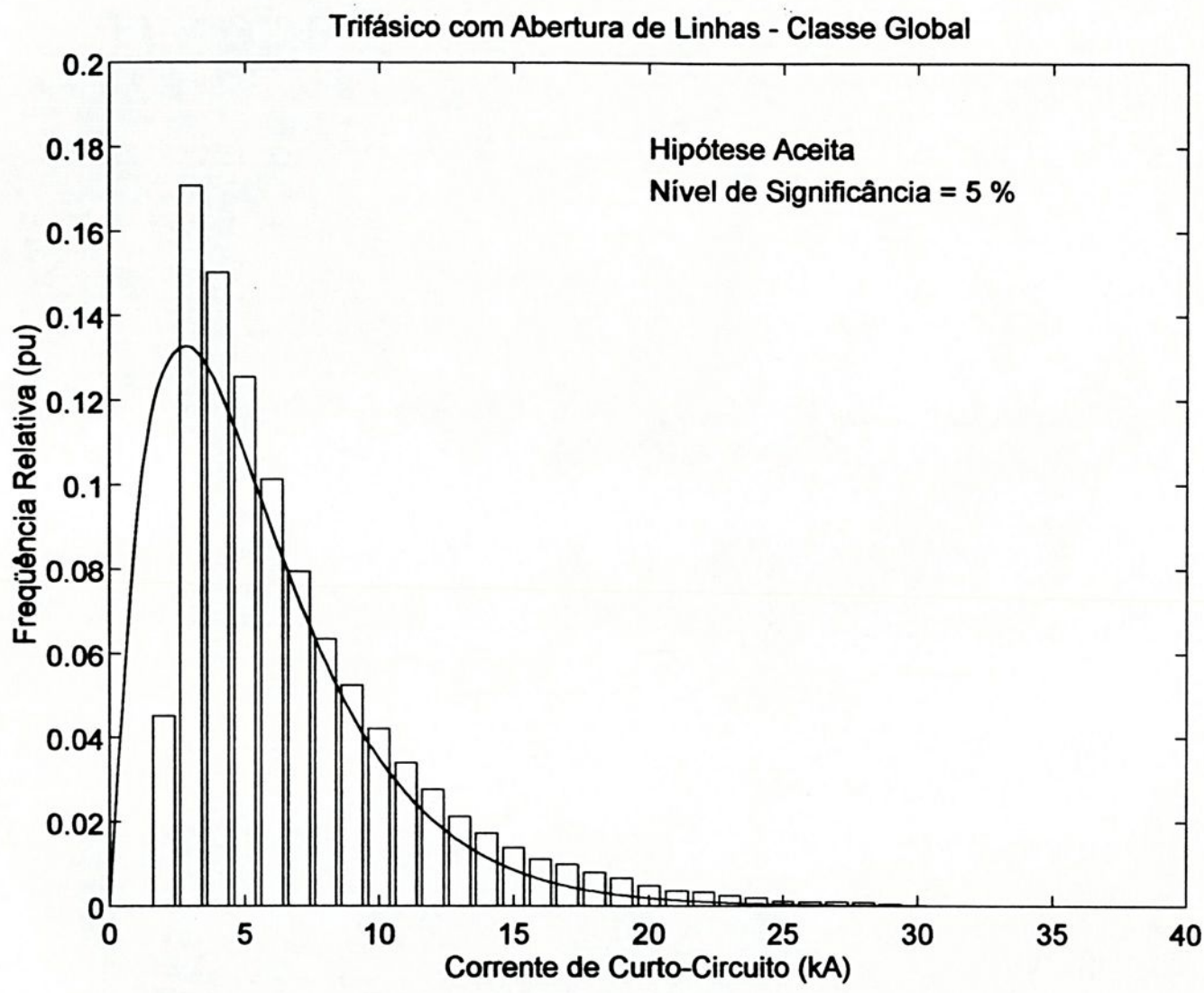


Figura V.4 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Trifásicos nas Linhas Classe Global

Bifásico com Abertura de Linhas - Classe 1

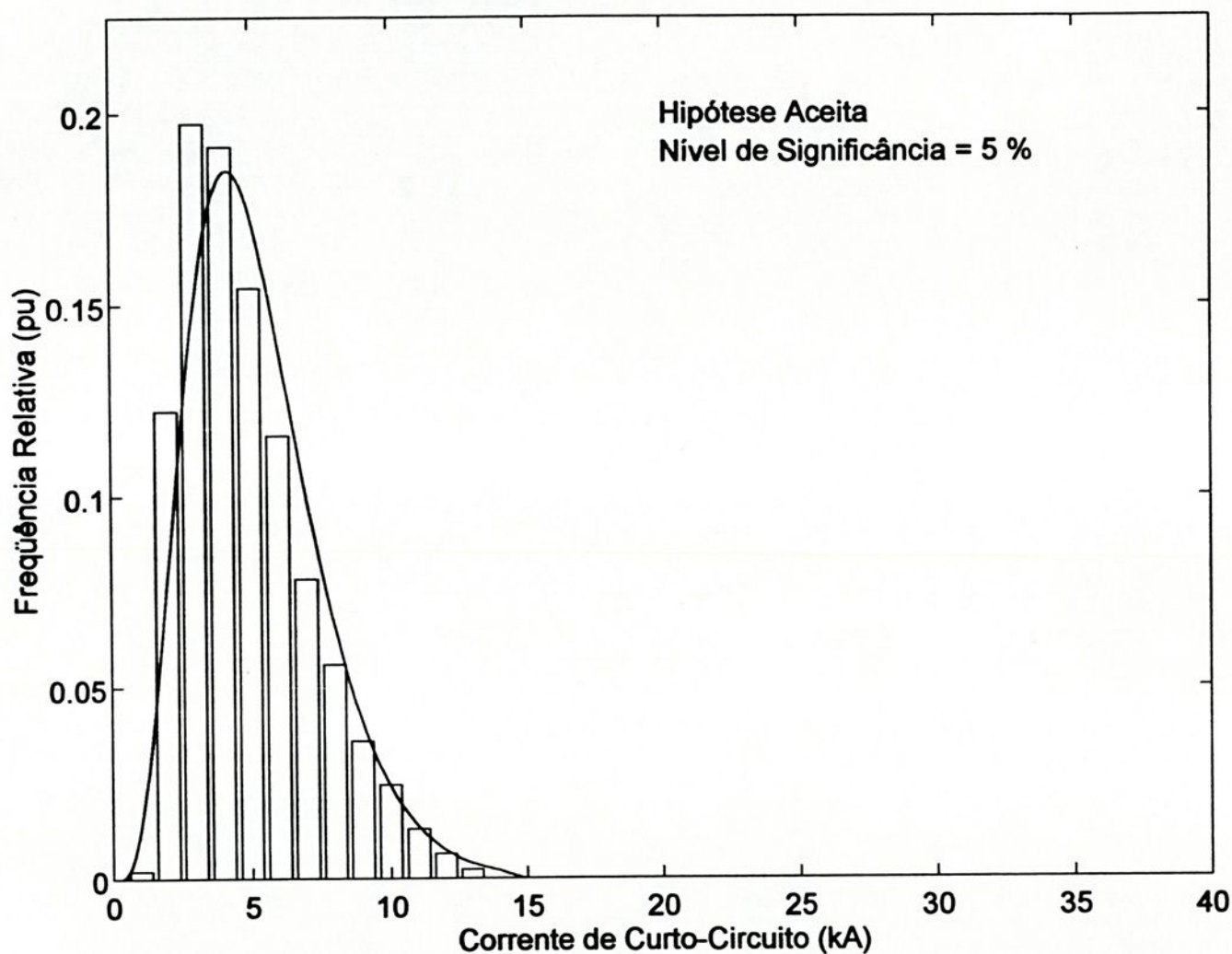


Figura V.5 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Bifásicos nas Linhas Classe 1

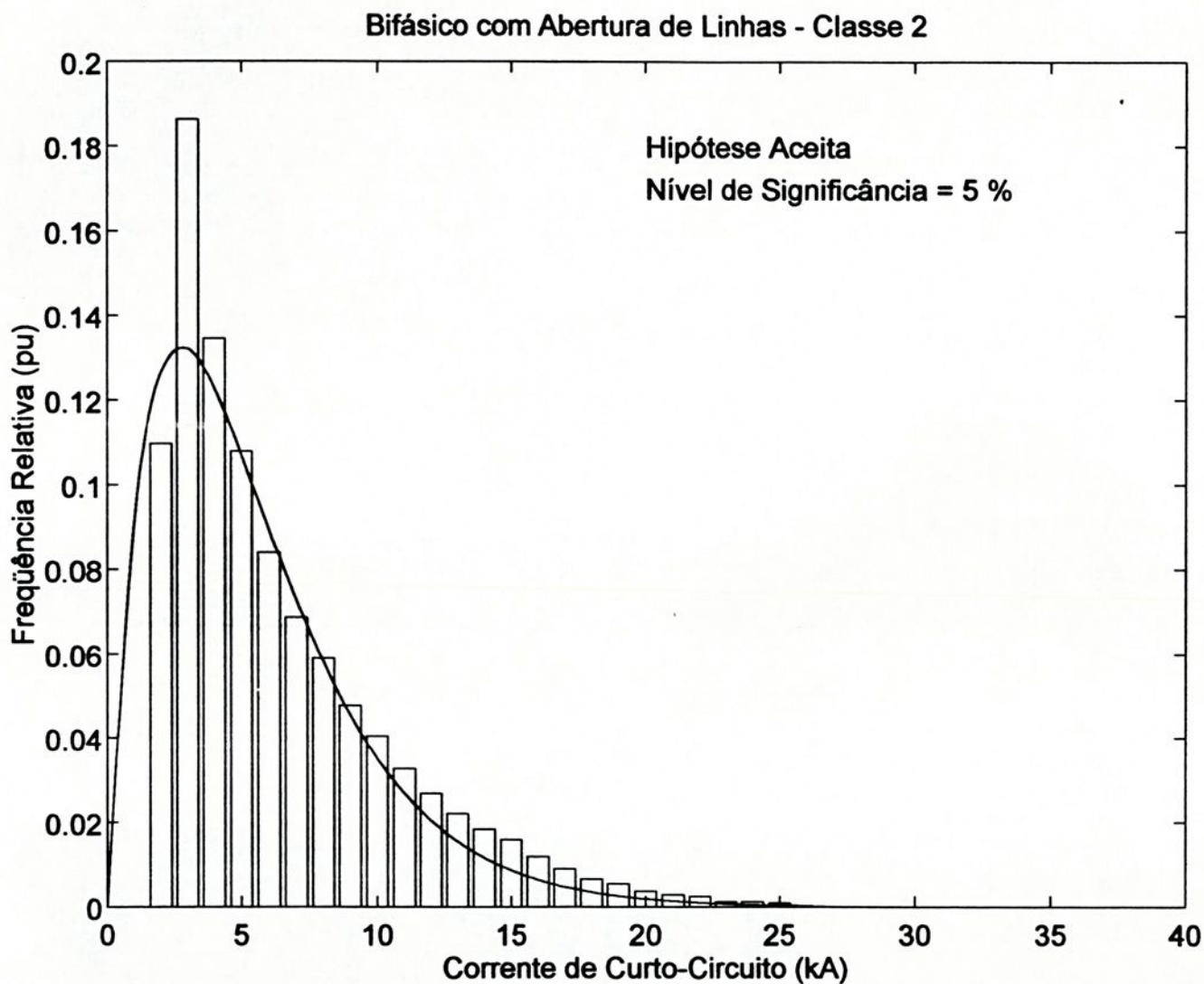


Figura V.6 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Bifásicos nas Linhas Classe 2

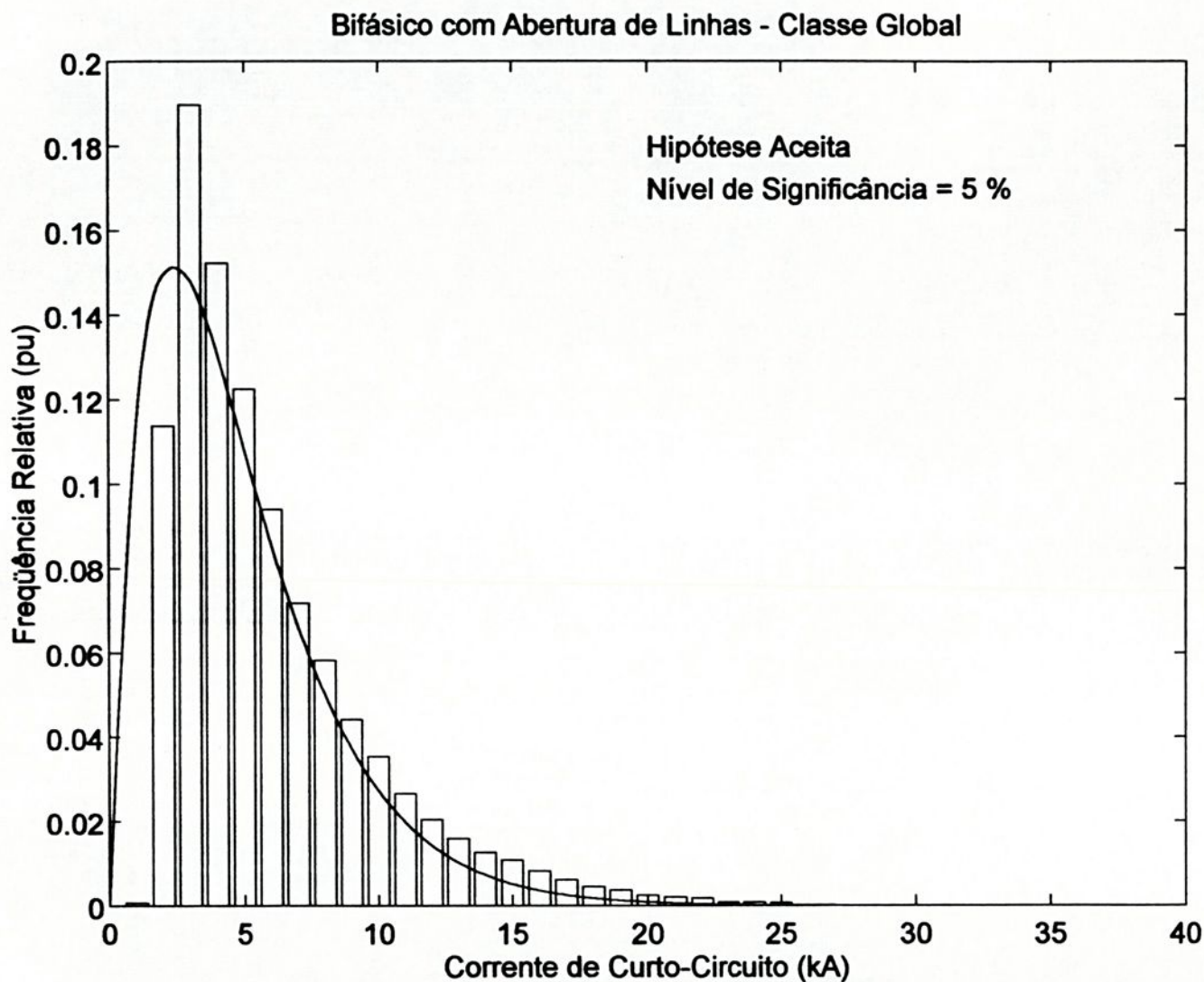


Figura V.7 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Bifásicos nas Linhas Classe Global

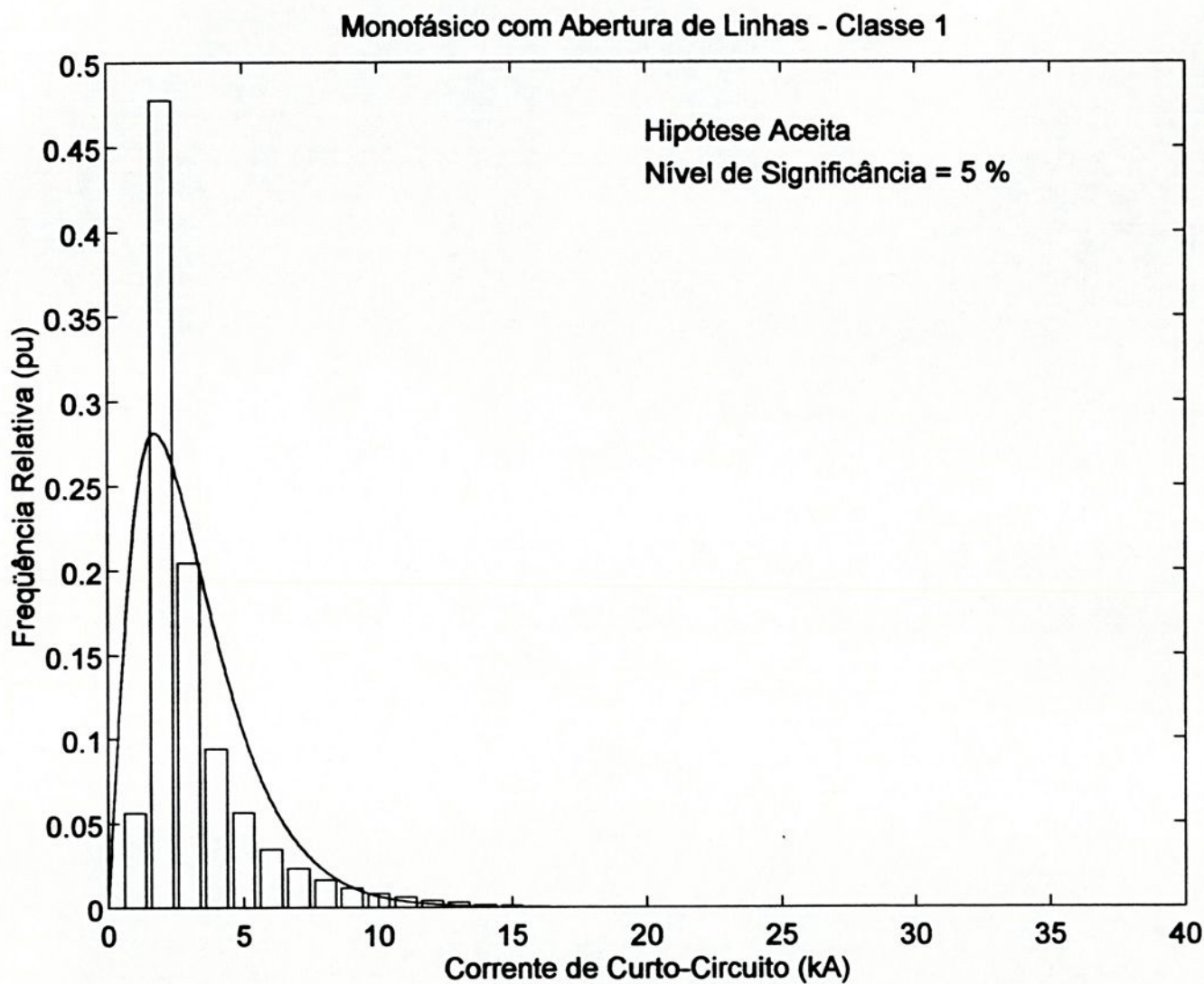


Figura V.8 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe 1

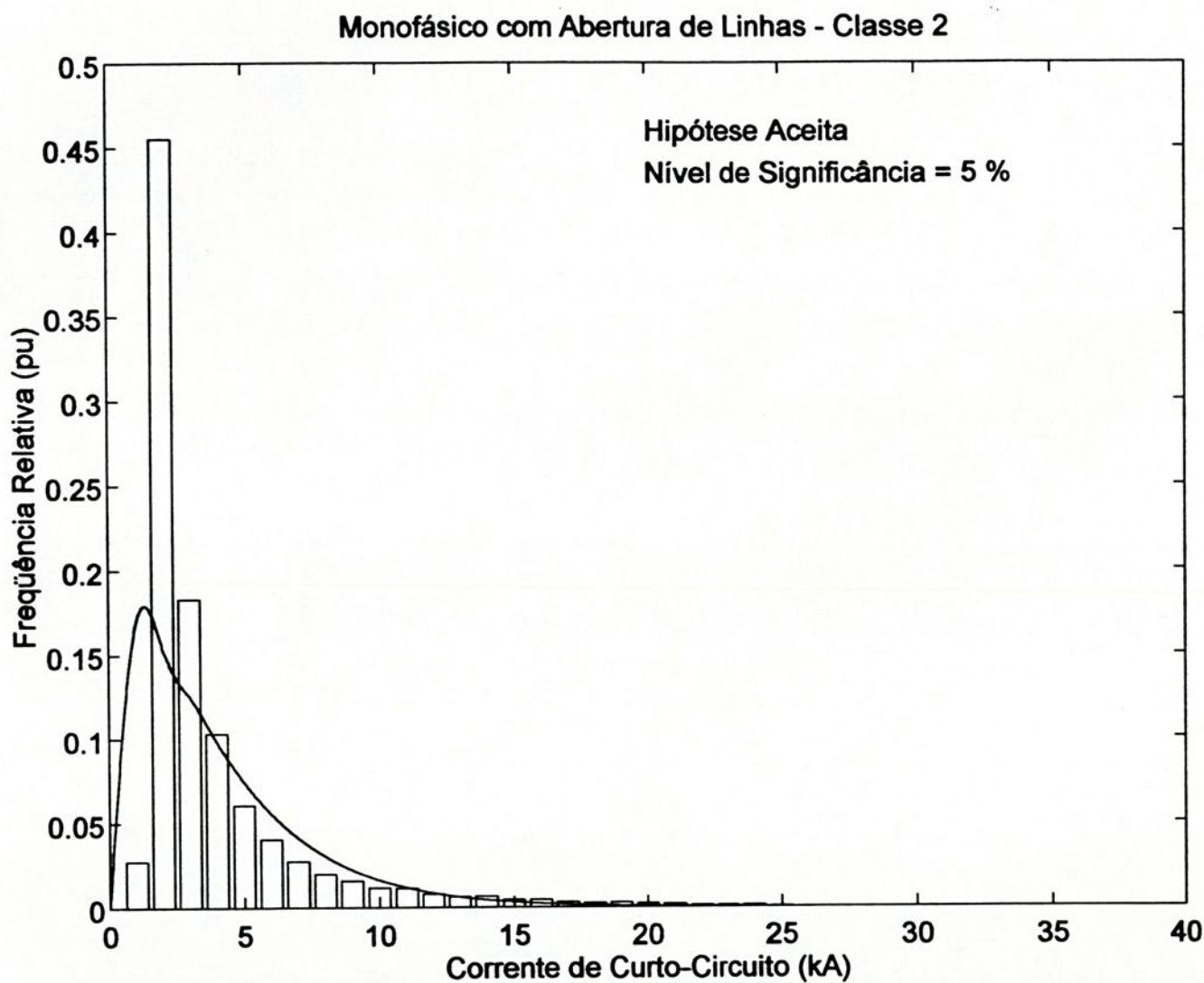


Figura V.9 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe 2

Monofásico com Abertura de Linhas - Classe 3

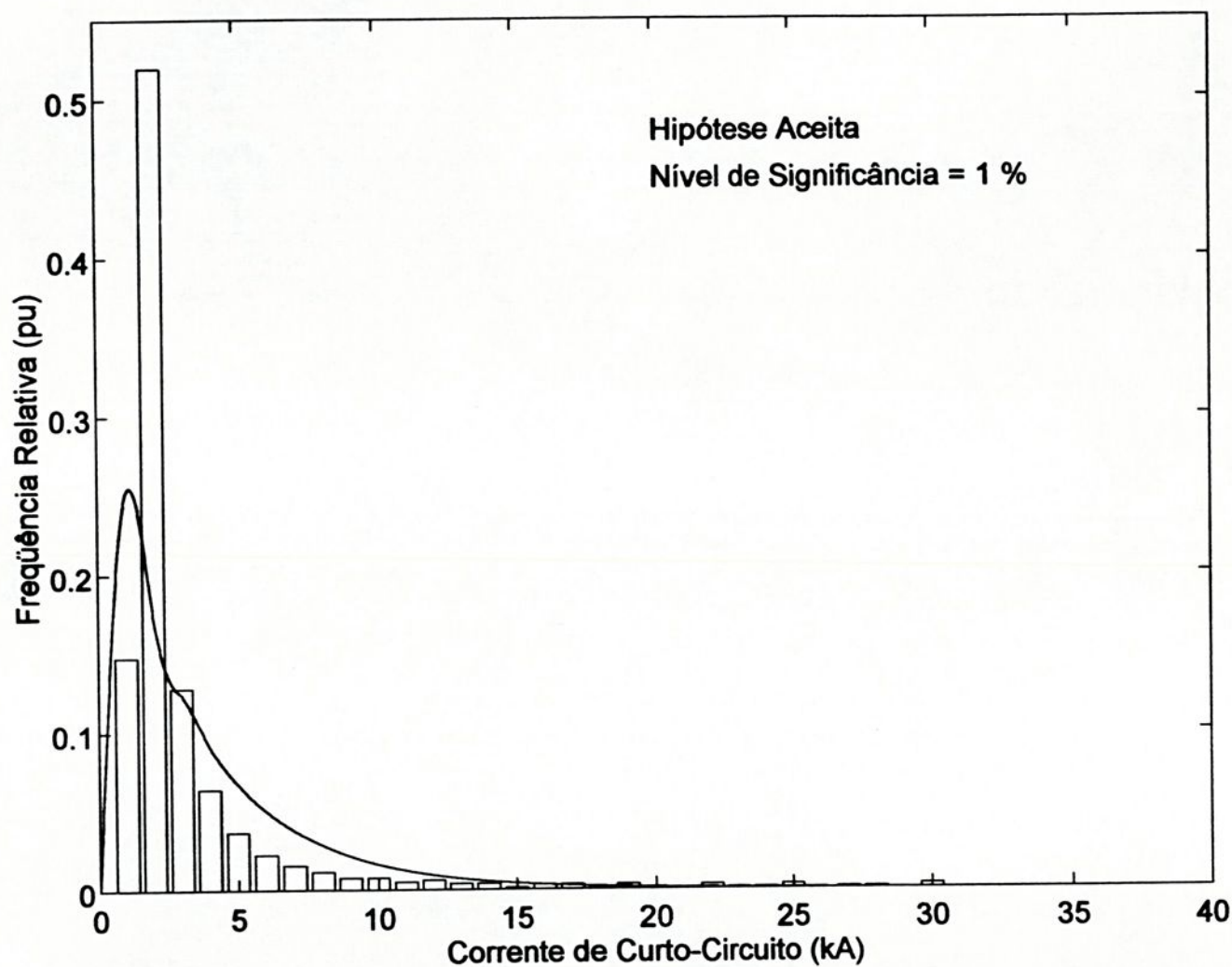


Figura V.10 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe 3

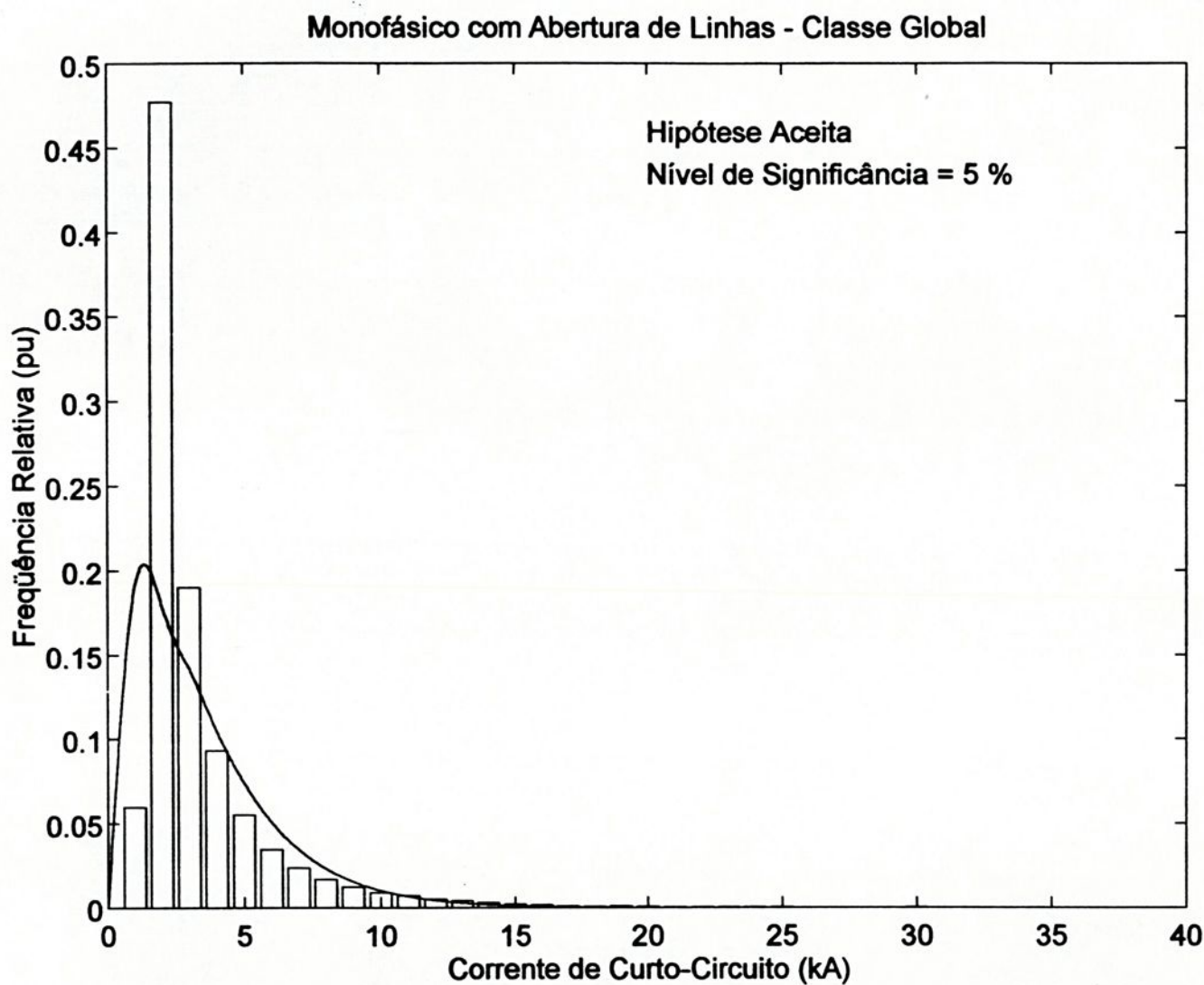


Figura V.11 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe Global

Trifásico com Inserção de Barra - Classe 1

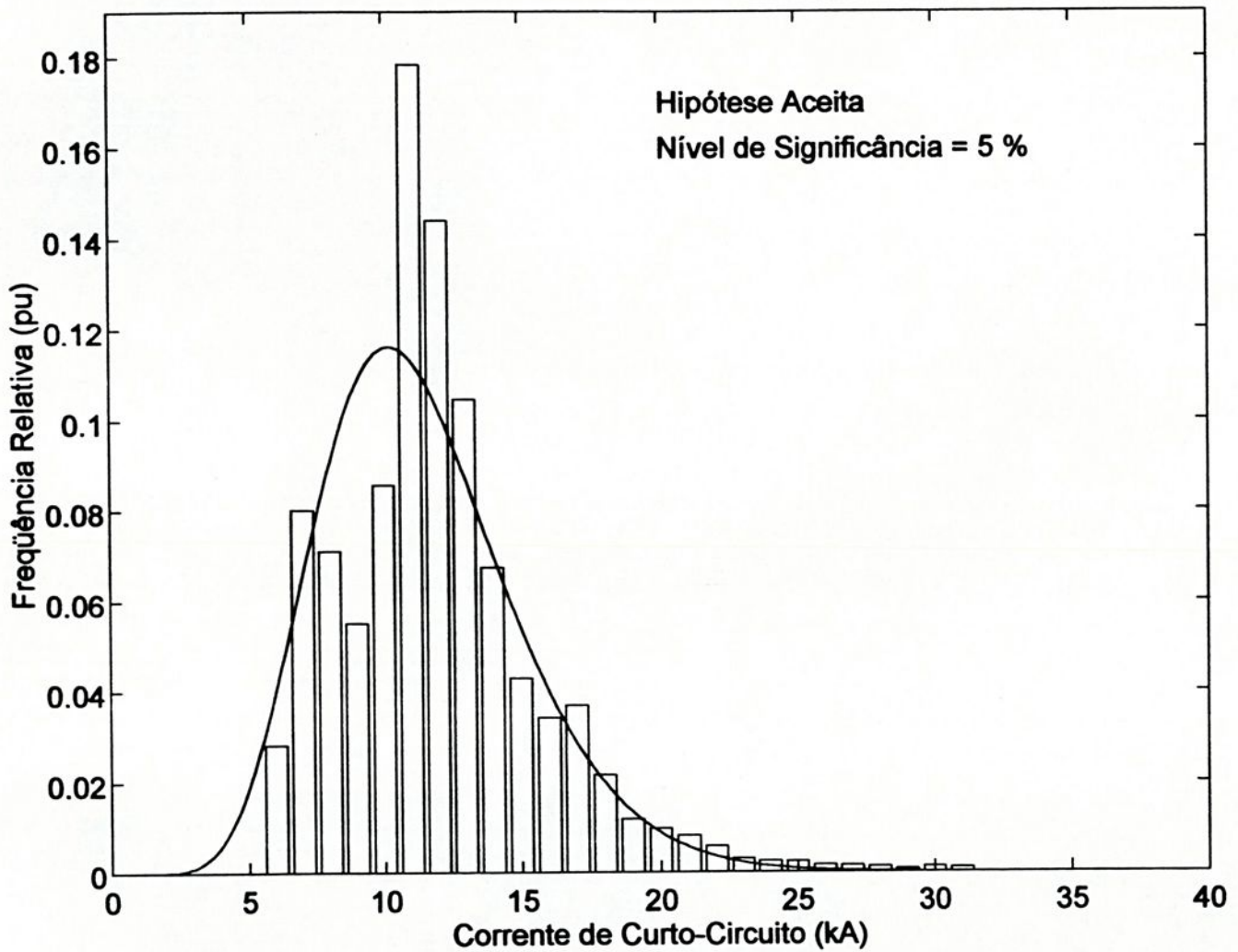


Figura V.12 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Trifásicos nas Linhas Classe 1

Trifásico com Inserção de Barra - Classe 2

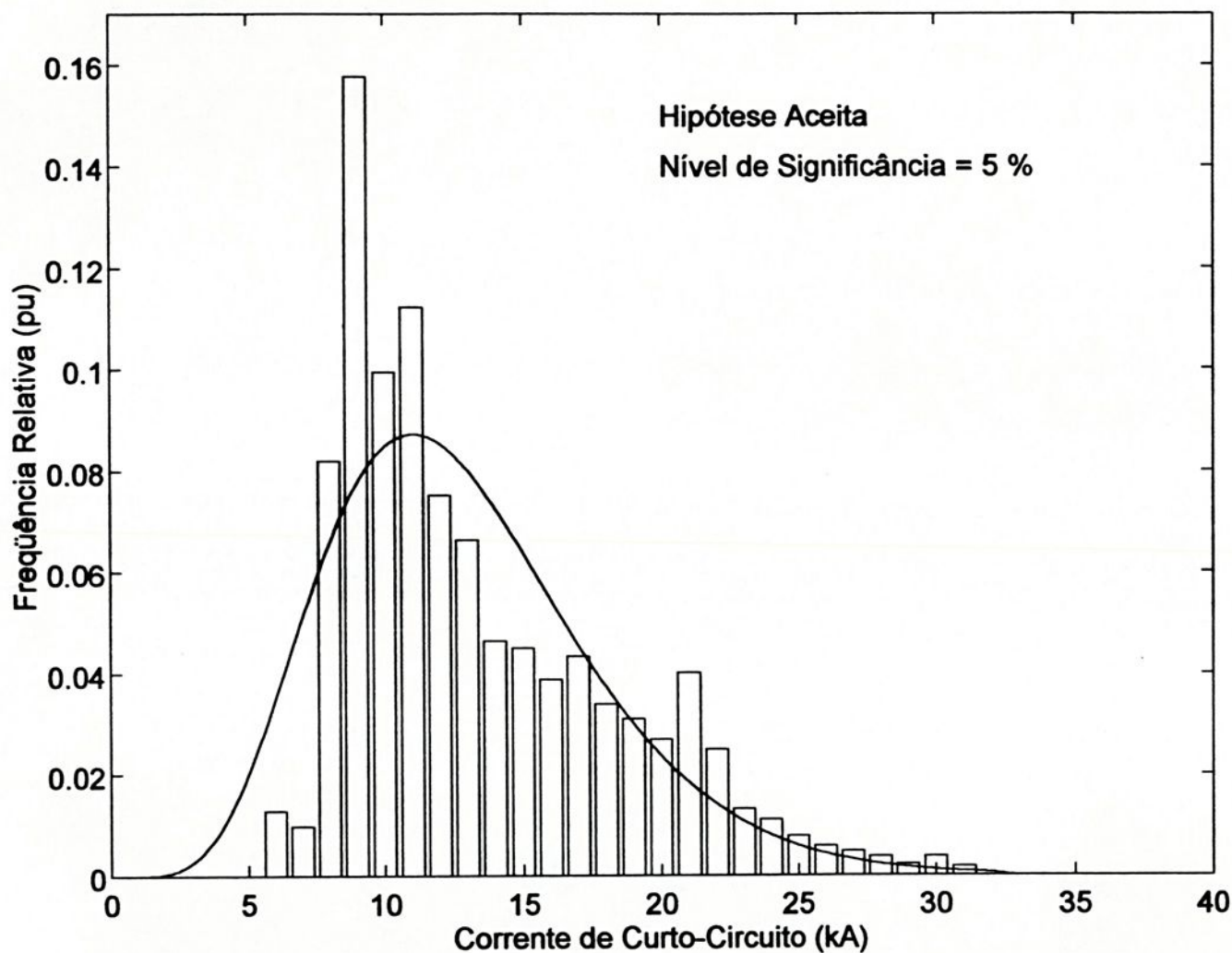


Figura V.13 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Trifásicos nas Linhas Classe 2

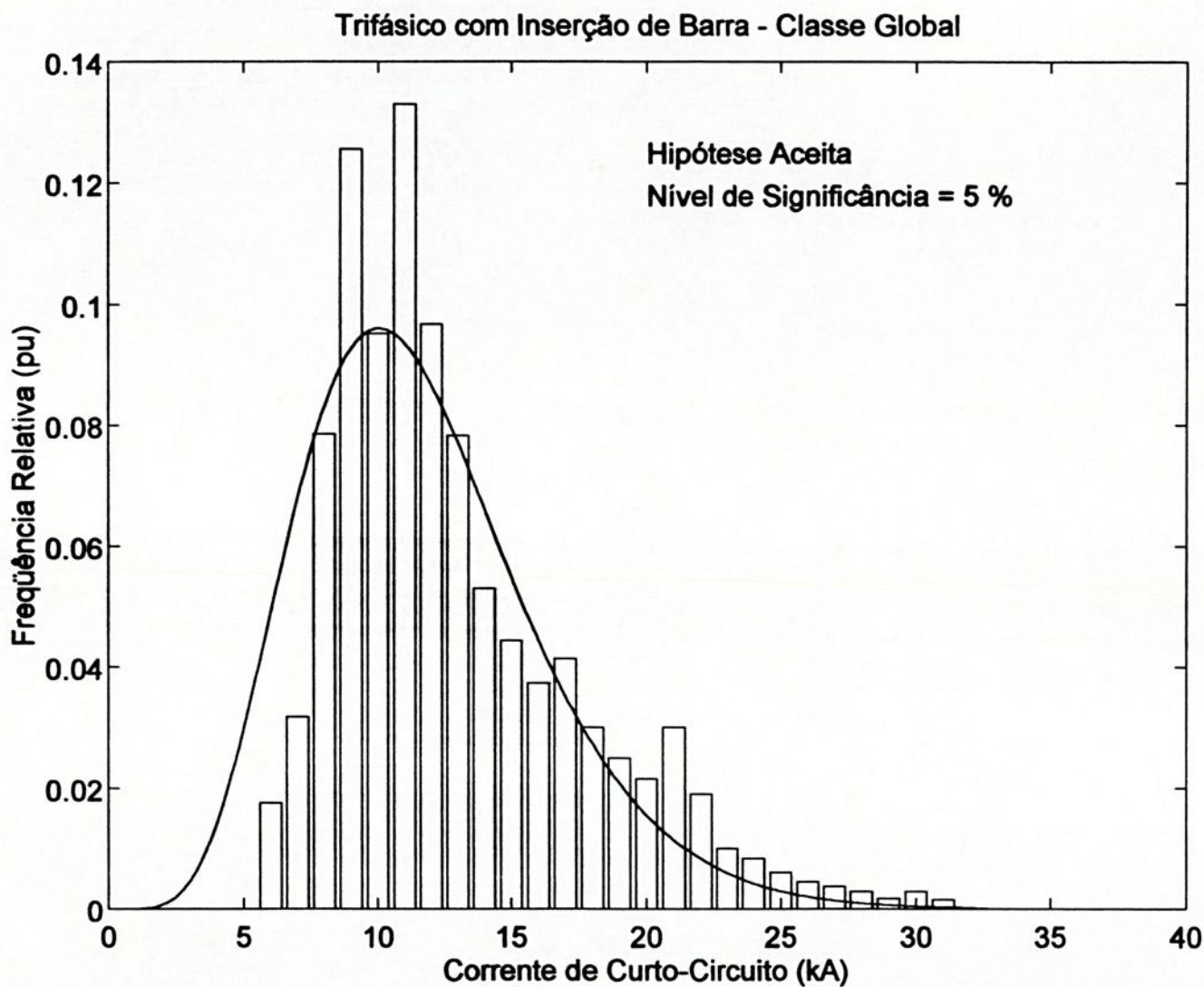


Figura V.14 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Trifásicos nas Linhas Classe Global

Bifásico com Inserção de Barra - Classe 1

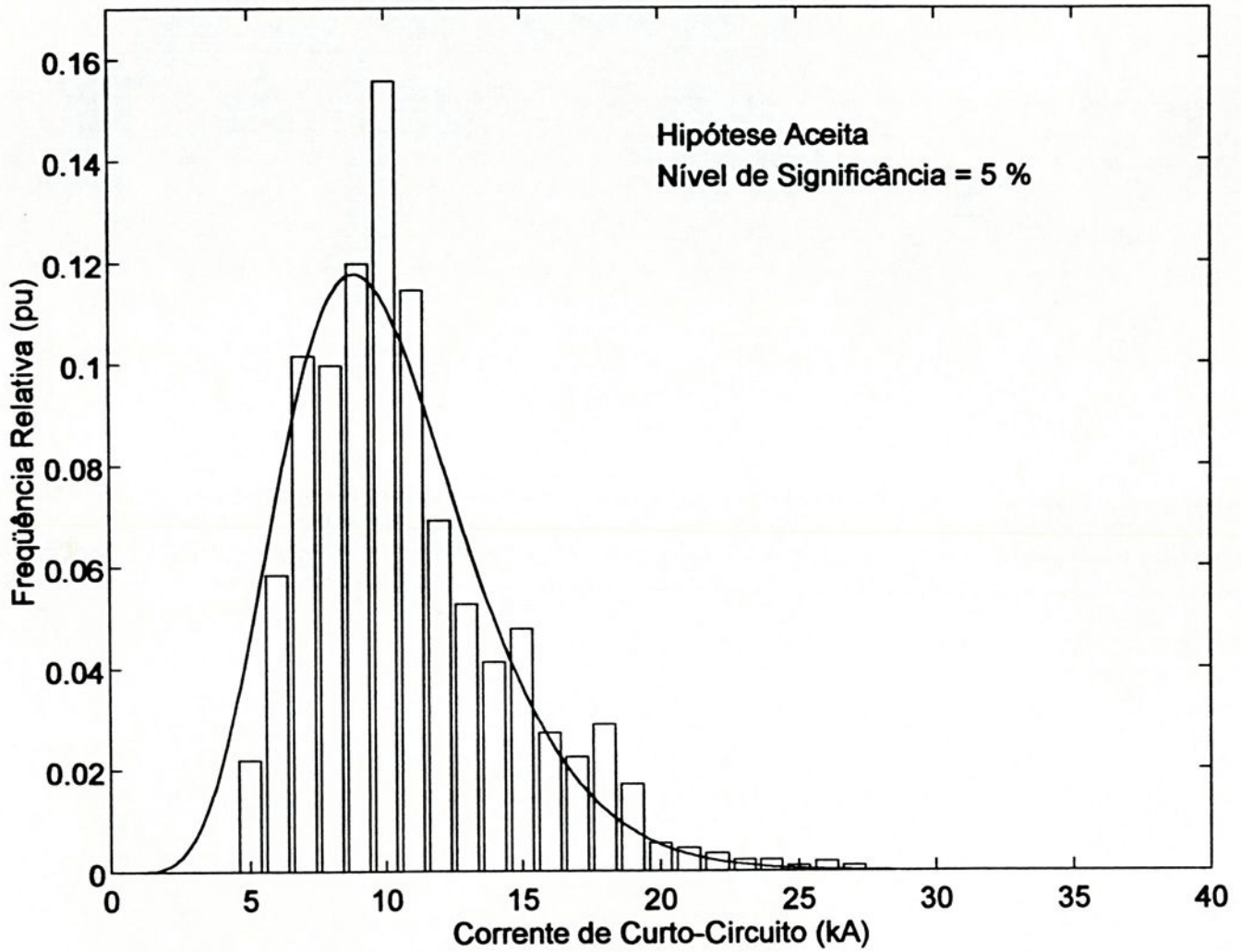


Figura V.15 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Bifásicos nas Linhas Classe 1

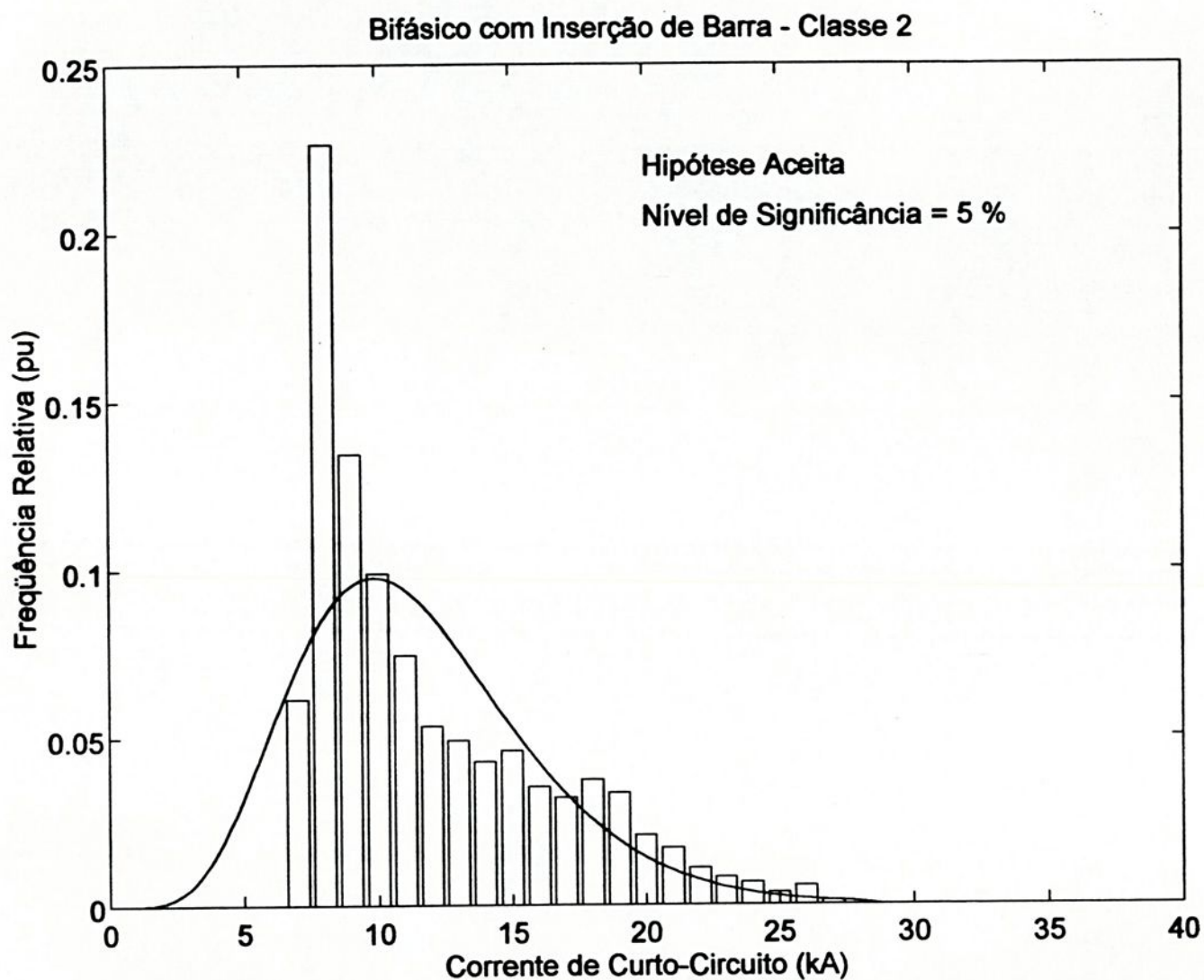


Figura V.16 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Bifásicos nas Linhas Classe 2

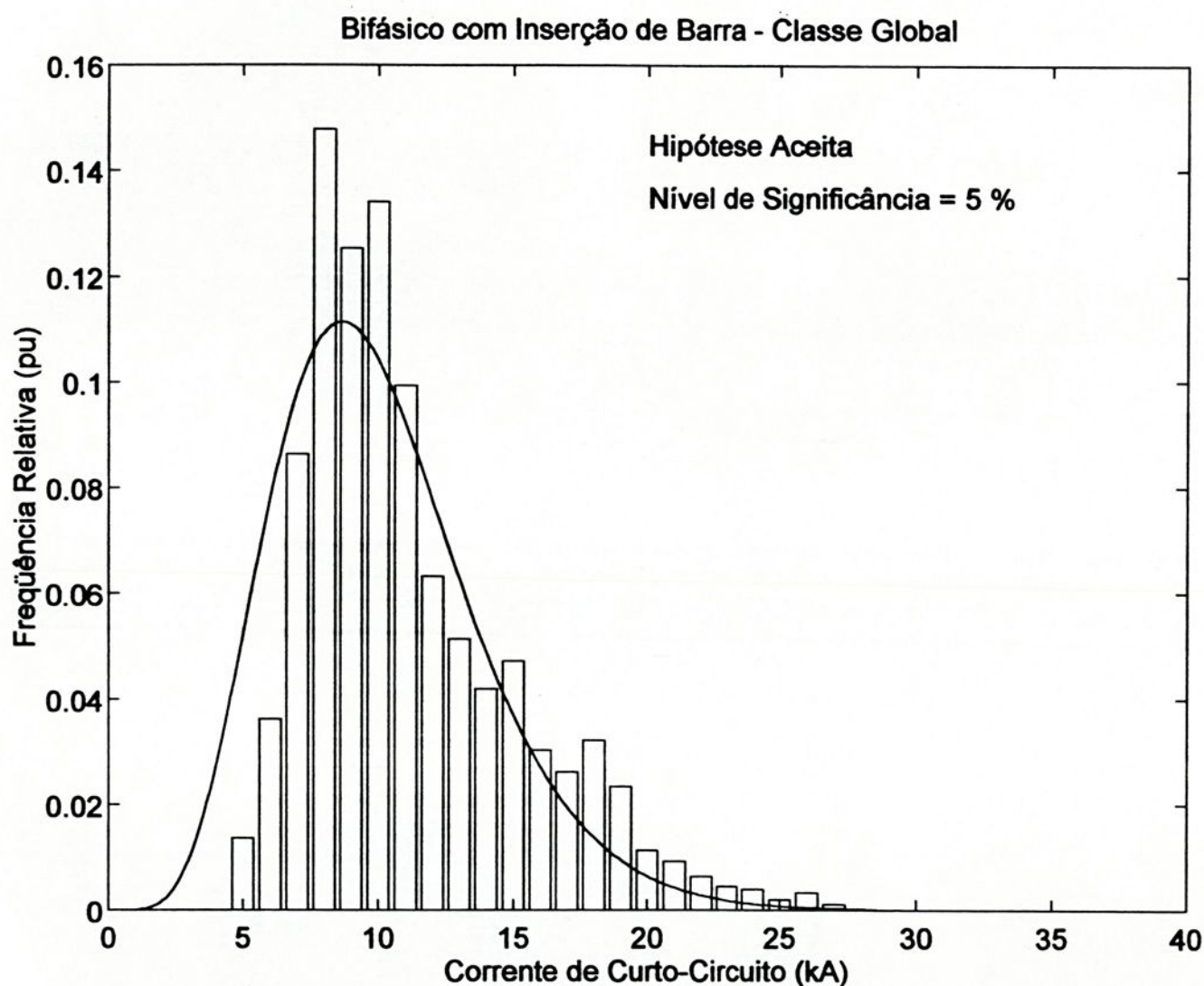


Figura V.17 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Bifásicos nas Linhas Classe Global

Monofásico com Inserção de Barra - Classe 1

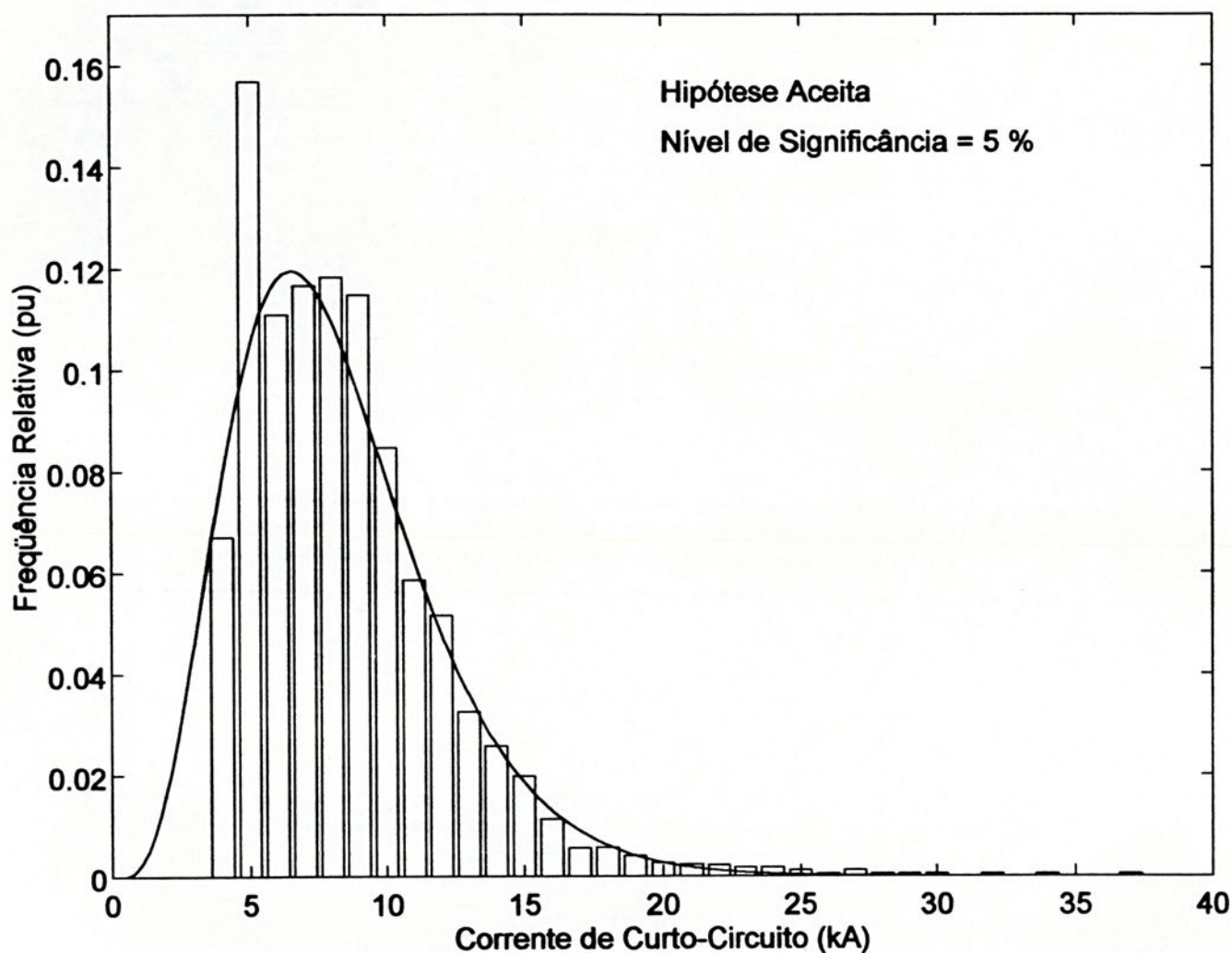


Figura V.18 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe 1

Monofásico com Inserção de Barra - Classe 2

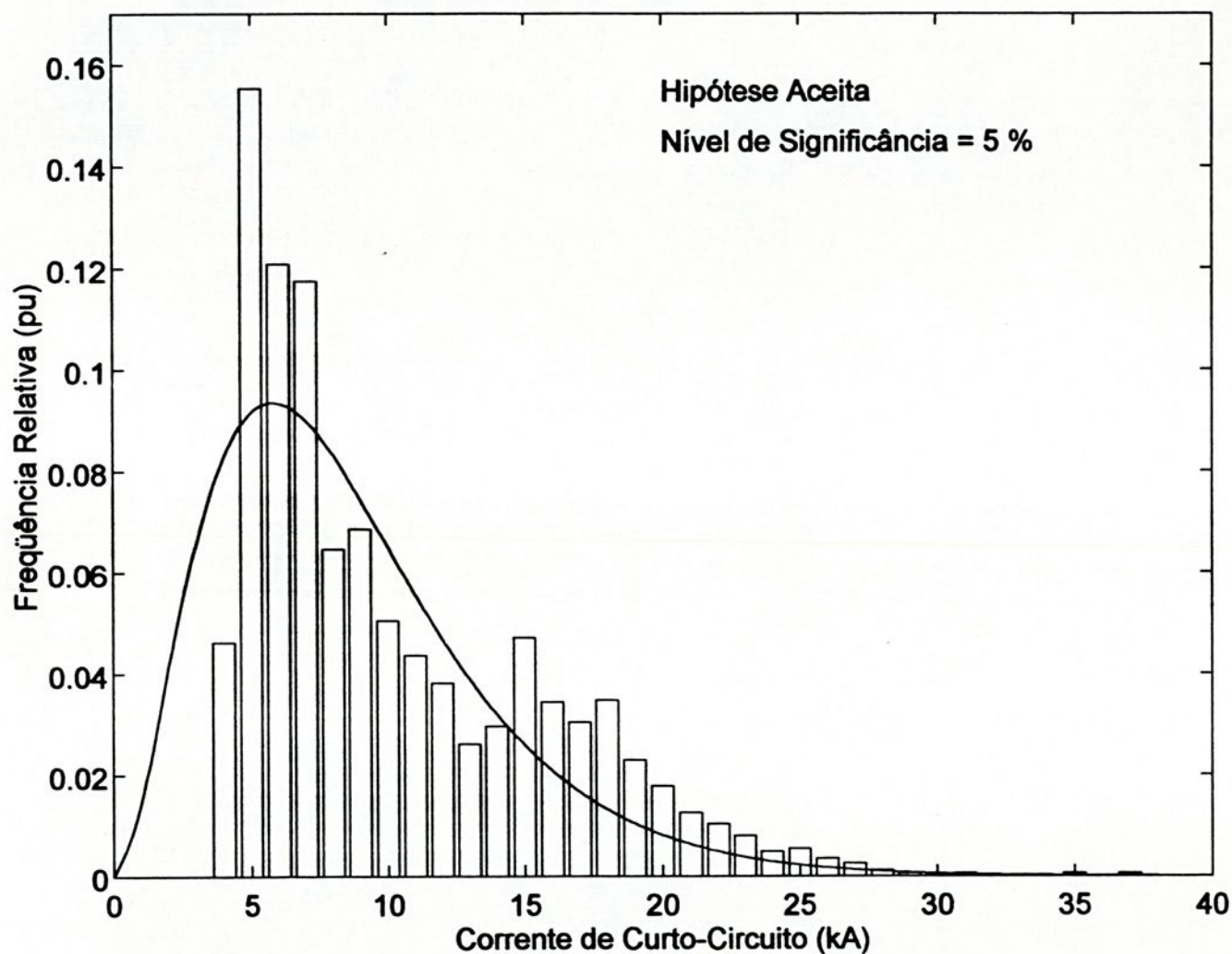


Figura V.19 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe 2

Monofásico com Inserção de Barra - Classe 3

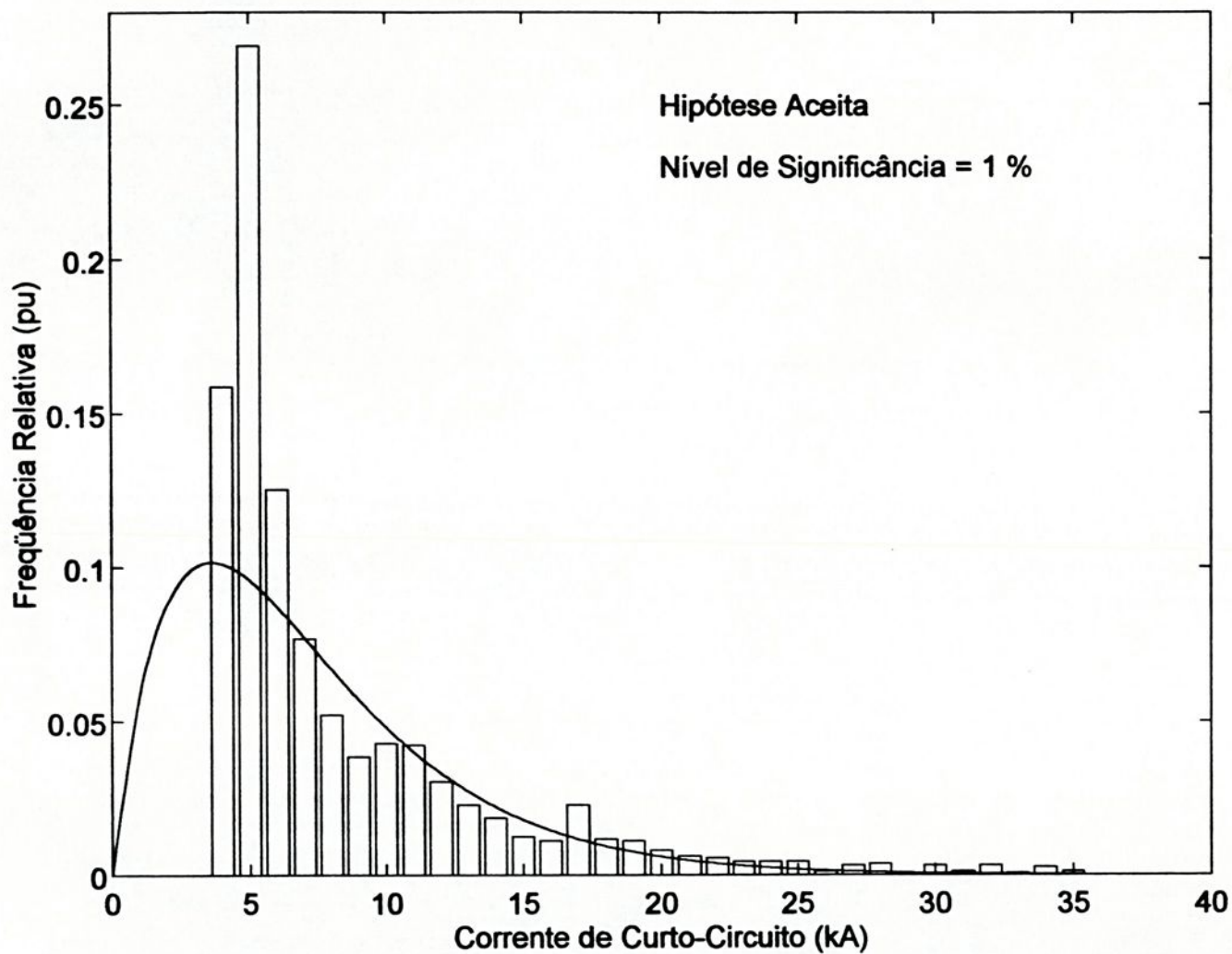


Figura V.20 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe 3

Monofásico com Inserção de Barra - Classe Global

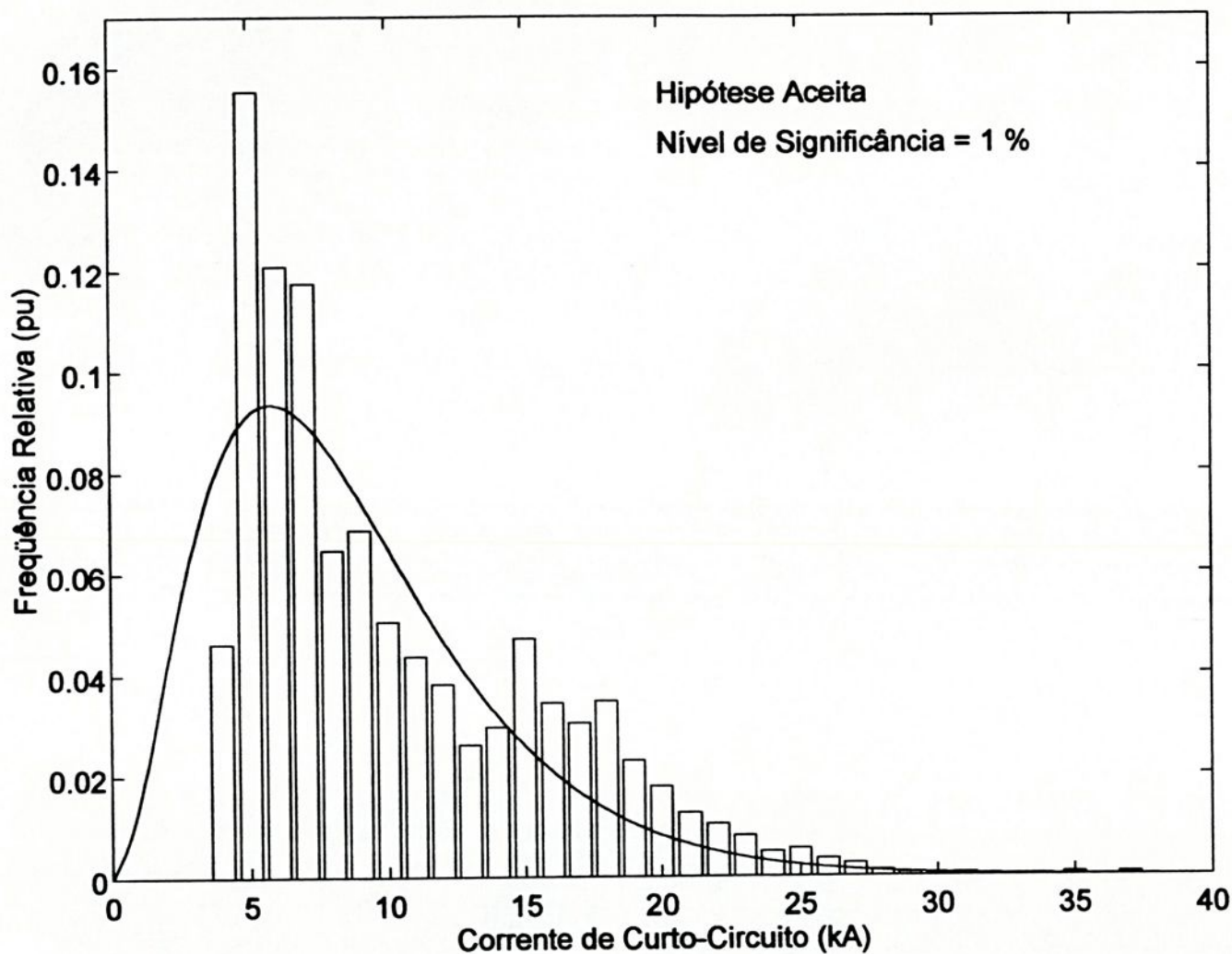


Figura V.21 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos Monofásicos nas Linhas Classe Global

Tabela V.1 – Parâmetros Característicos das Distribuições de Correntes de Falta Trifásica, Bifásica e Monofásica nas Linhas.

Método Direto							
Com Abertura de Linhas							
Nível de Tensão(kV)	Falta	Número de Pontos	Média (kA)	σ (kA)	Mediana (kA)	3 ^o Quartil (kA)	Valor Máx. (kA)
440	Trifásica	13.852	6,39	4,38	5,60	8,77	29,0
	Bifásica	13.852	5,48	3,78	4,85	7,61	25,0
	Monofásica	13.852	2,35	2,64	1,81	3,25	19,0
Com Inserção de Barra							
Nível de Tensão(kV)	Falta	Número de Pontos	Média (kA)	σ (kA)	Mediana (kA)	3 ^o Quartil (kA)	Valor Máx. (kA)
440	Trifásica	13.852	12,95	4,65	12,19	15,91	31,0
	Bifásica	13.852	11,23	4,02	10,68	13,85	27,0
	Monofásica	13.852	8,96	4,52	8,32	11,35	37,0



Os elementos de Z^b são definidos como:

$$Z_{\mu\nu}^b = \frac{V_\mu}{I_\nu} \bigg|_{I_n=0}, \quad \forall_n \neq 0 \quad \text{e } (\mu, \nu = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{VIII-5})$$

e

$$Z_{\mu\nu}^b = Z_{\nu\mu}^b \quad (\text{VIII-6})$$

Da relação (VIII-3), fica evidente que $Z_{\mu\nu}^b = Z_{\nu\mu}$, para $\mu, \nu \neq m$, desde que esses elementos não mudem com a adição da barra.

Para os elementos simétricos de Z^b , quando $\mu = m$ e $\nu = 1, 2, \dots, m-1$, segue a relação:

$$Z_{m\nu}^b = \frac{V_\mu}{I_\nu} \bigg|_{I_n=0}, \quad \forall_n \neq \nu \quad (\text{VIII-7})$$

Da figura a seguir pode-se escrever:

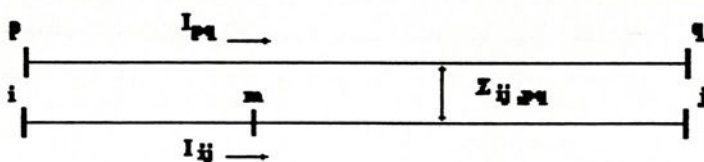


Figura VIII.2 - Corrente induzida na linha ij devido a falta na linha pq.

$$V_m - V_i = \lambda z_{ij} I_{ij} + \sum_{pq} \lambda z_{ij,pq} I_{pq} \quad (\text{VIII-8})$$

$$\frac{V_m - V_i}{\lambda} = z_{ij} I_{ij} + \sum_{pq} z_{ij,pq} I_{pq} \quad (\text{VIII-9})$$

A somatória $\sum_{pq}$ leva em conta os possíveis acoplamentos da linha (ij) com outras linhas da rede.

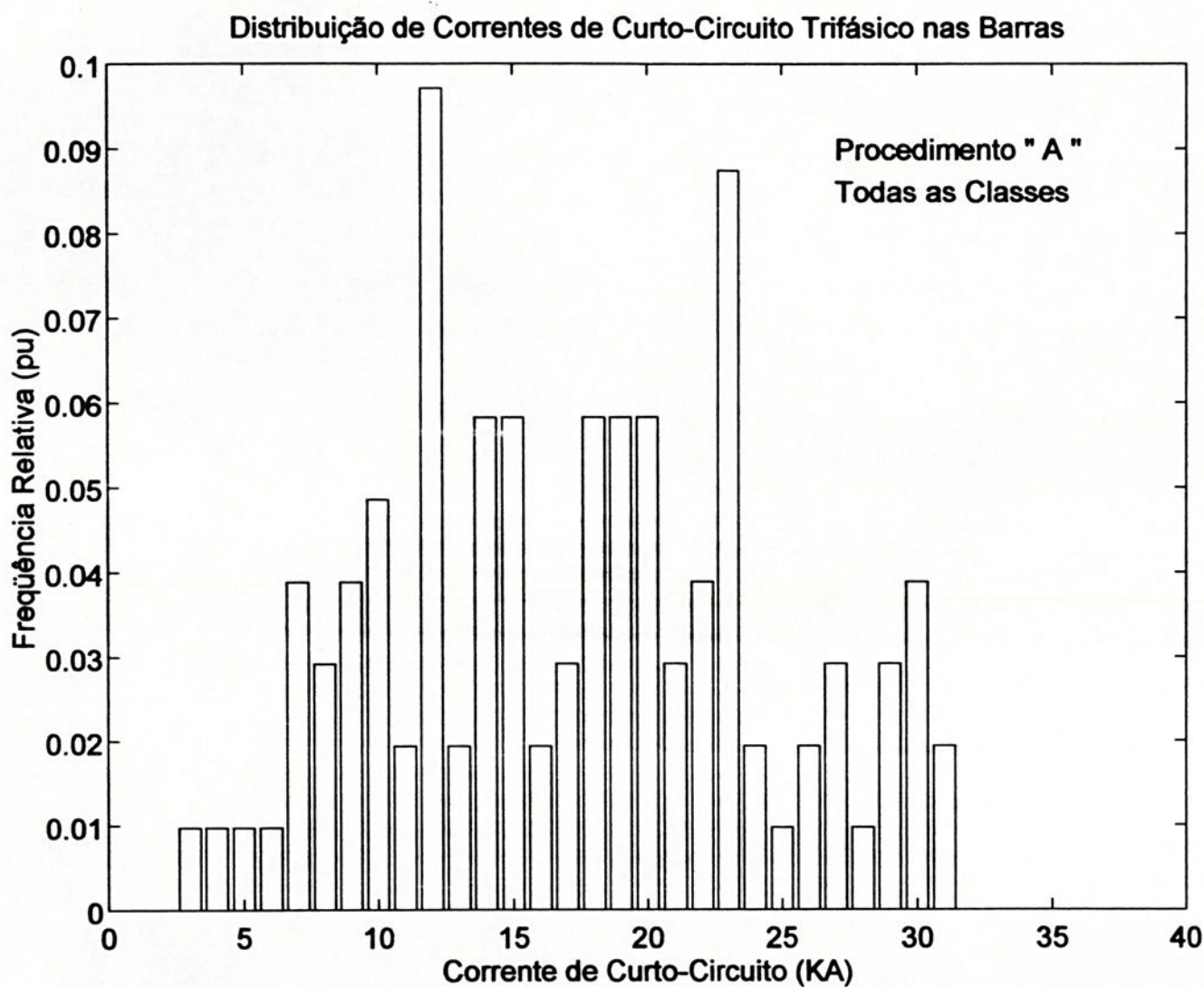
Tabela V.2 – Parâmetros Característicos da Distribuição de Constante de Tempo (L / R) - Sequência Positiva.

Nível de Tensão (kV)	Número de Pontos	Constante de Tempo (ms)	
		Média	σ
440	13.852	41,65	4,65

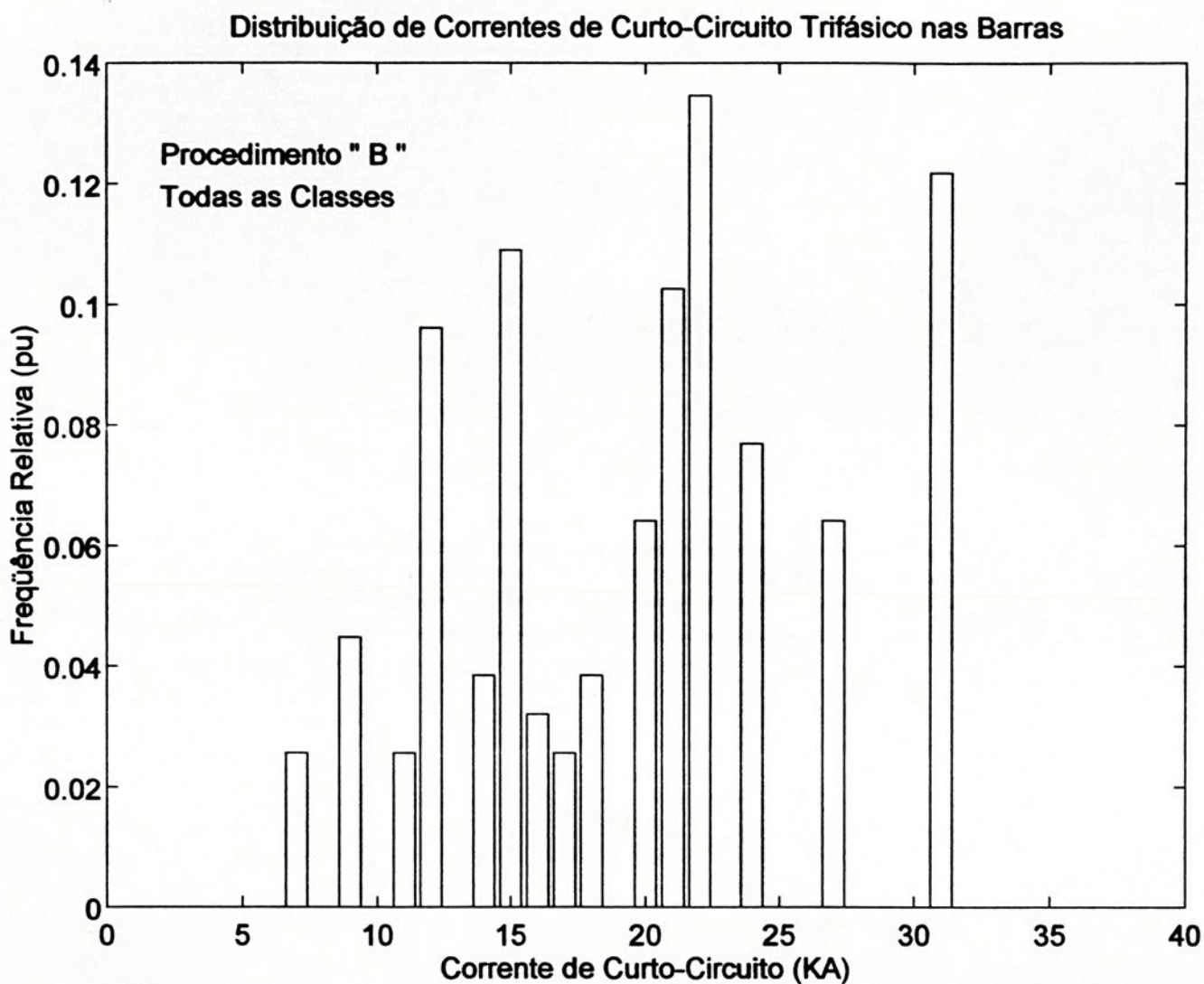
Tabela V.3 – Parâmetros Característicos da Distribuição de Comprimento das Linhas.

Nível de Tensão (kV)	Falta	Número de Linhas	Comprimento (Km)	
			Média	σ
440	Trifásica	80	172,05	105,13
	Bifásica	80	172,05	105,13
	Monofásica	67	170,06	108,04

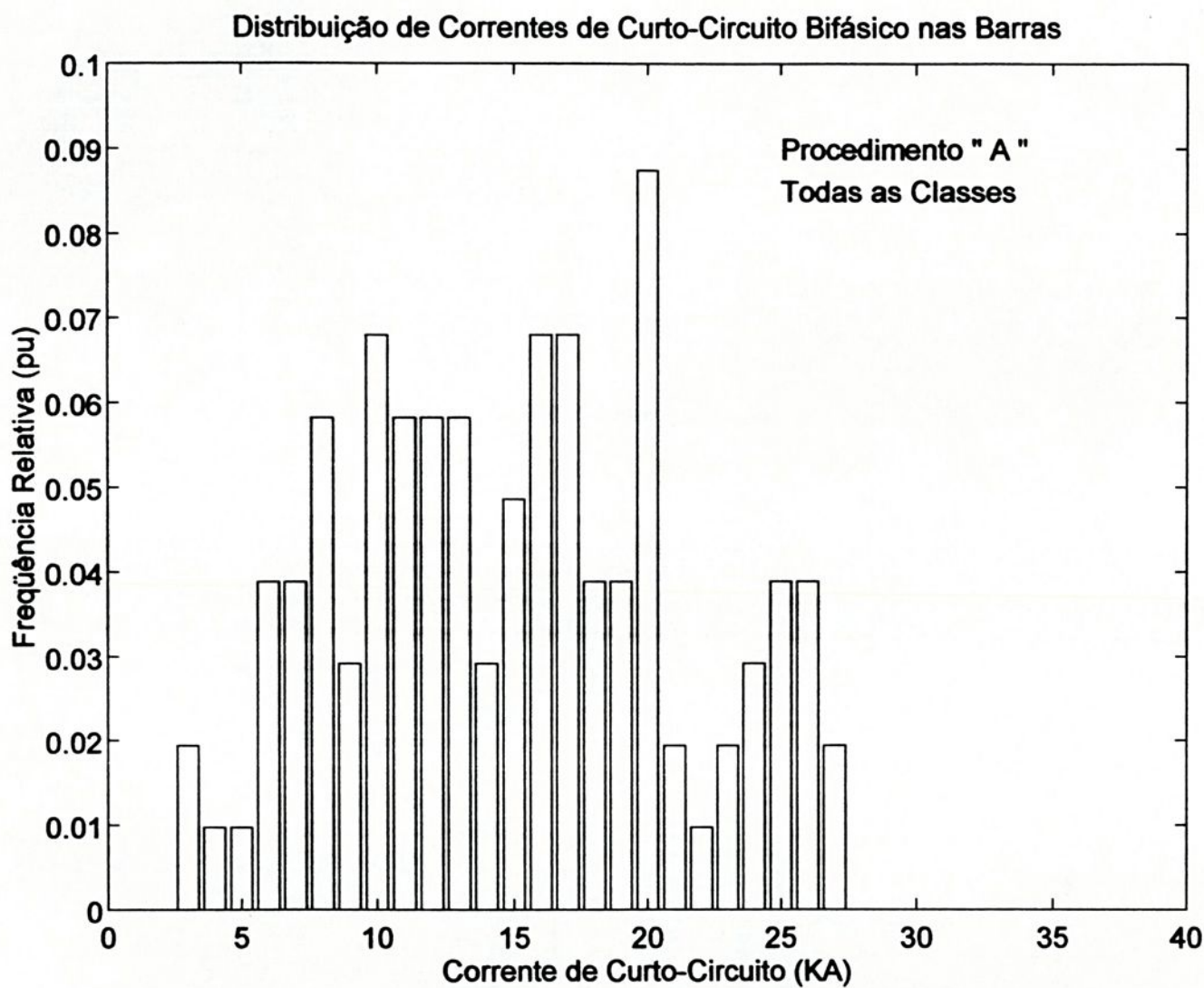




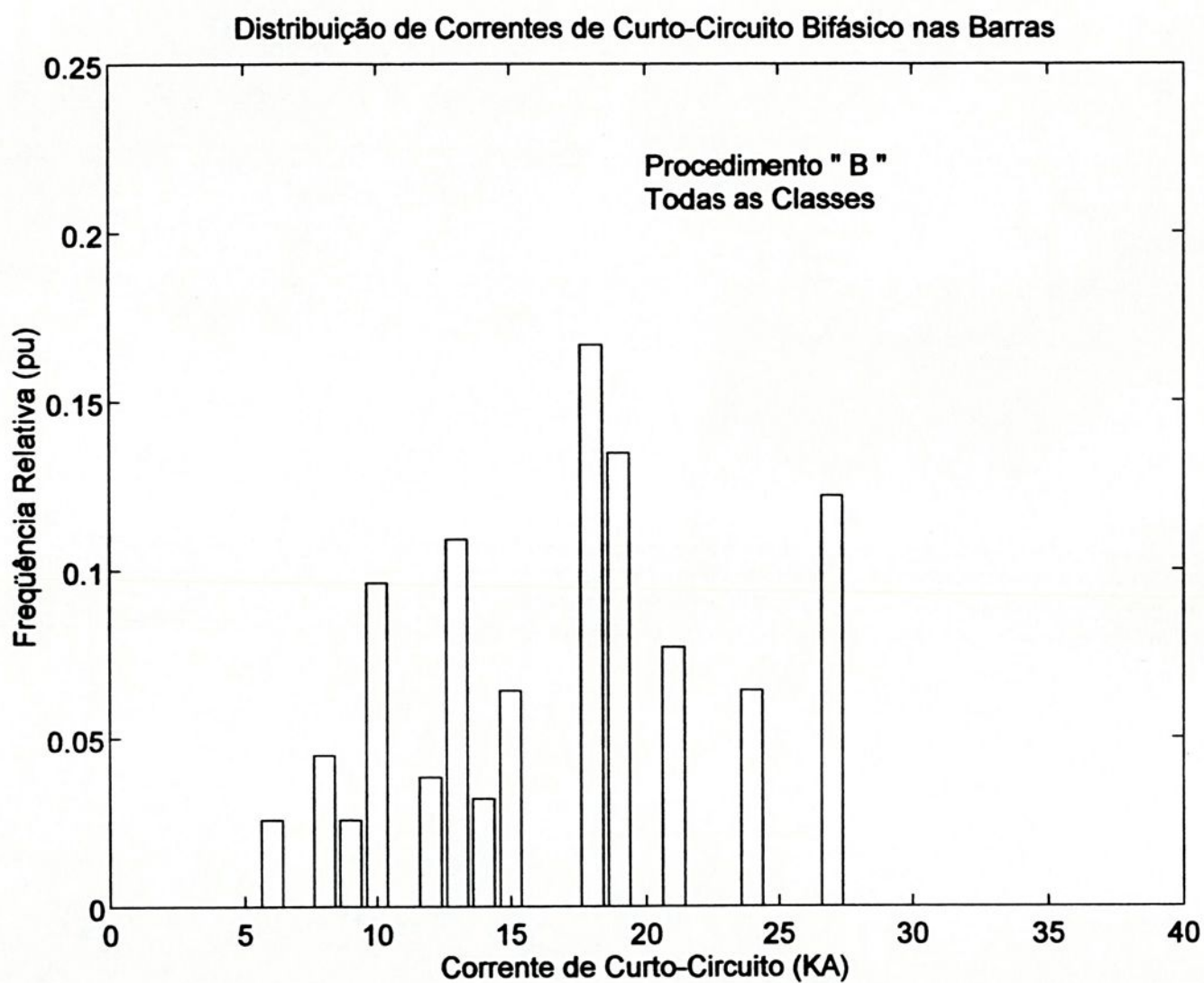
**Figura V.22 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos nas Barras da Rede
Procedimento A**



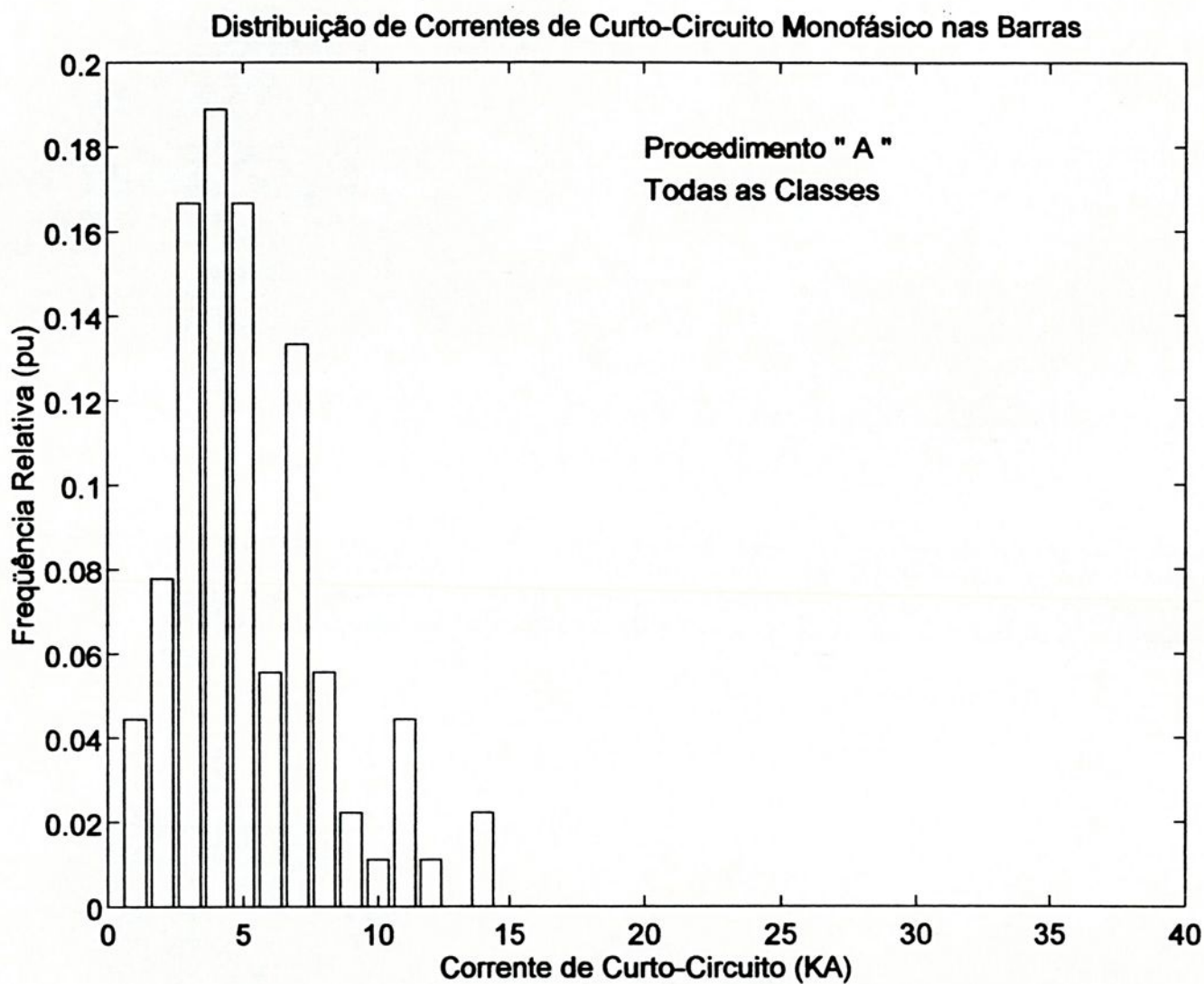
**Figura V.23 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos nas Barras da Rede
Procedimento B**



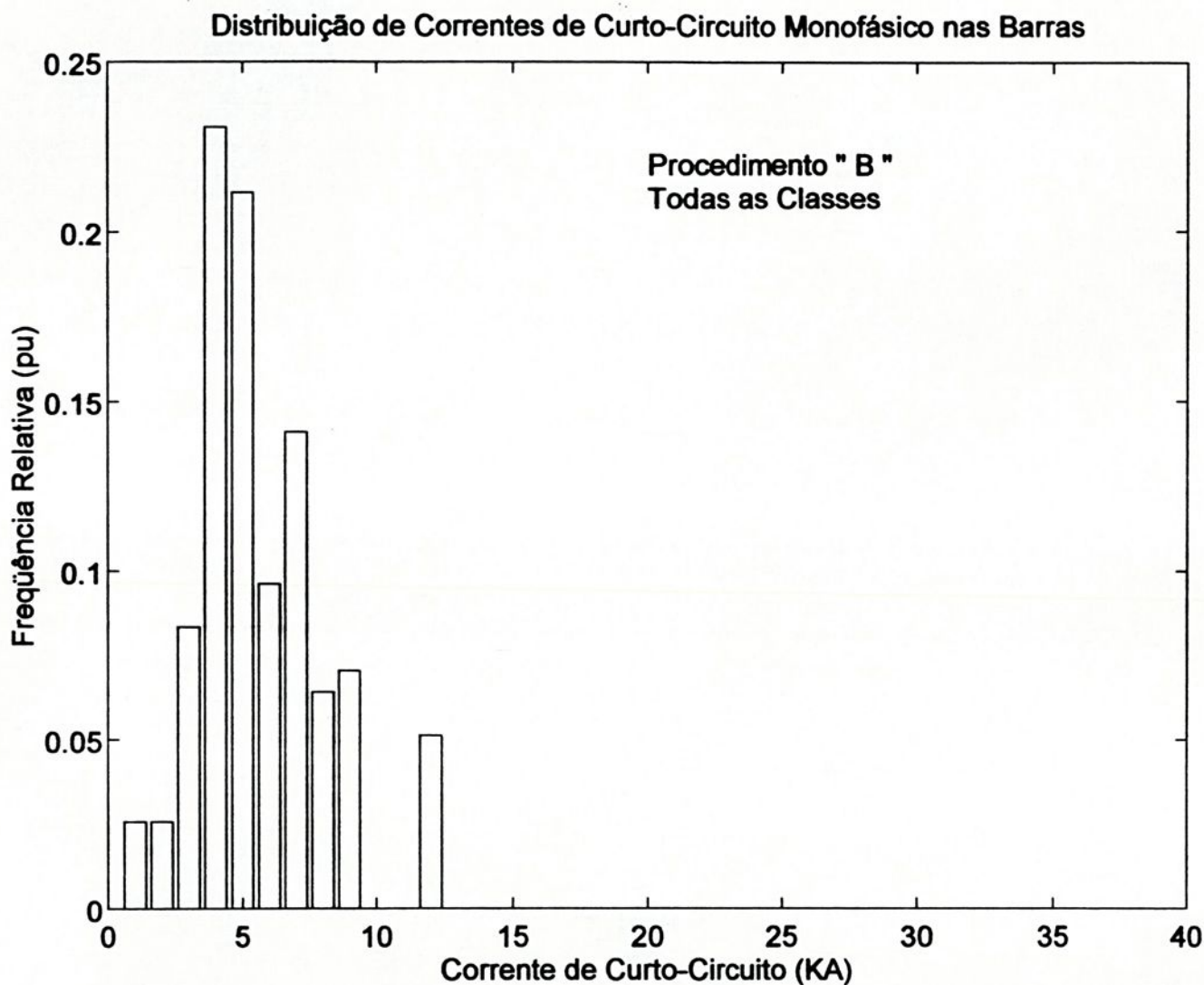
**Figura V.24 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos nas Barras da Rede
Procedimento A**



**Figura V.25 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos nas Barras da Rede
Procedimento B**



**Figura V.26 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos nas Barras da Rede
Procedimento A**



**Figura V.27 - Distribuição de Correntes de Curtos-Circuitos nas Barras da Rede
Procedimento B**

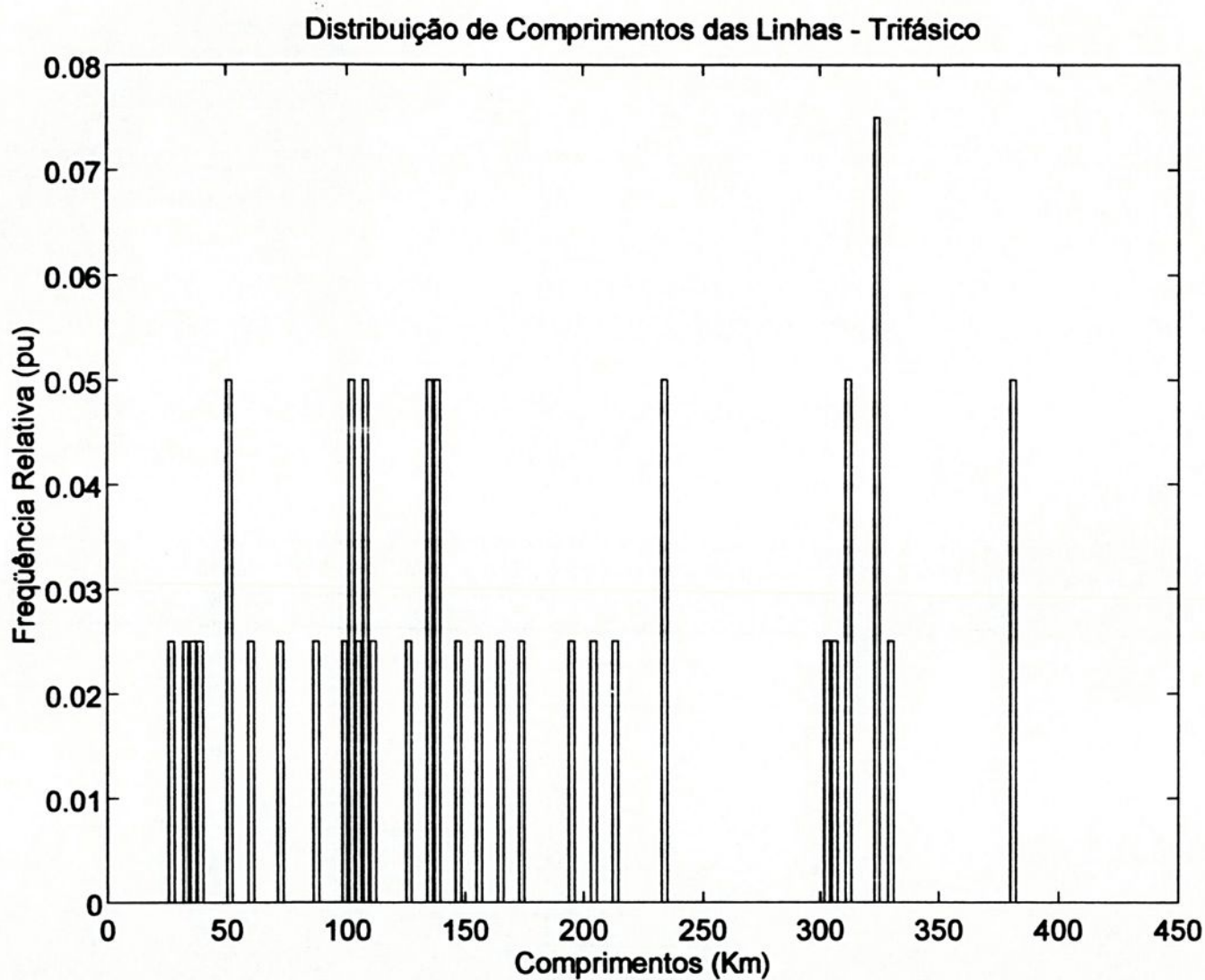


Figura V.28 - Distribuição de Comprimentos das Linhas da Rede

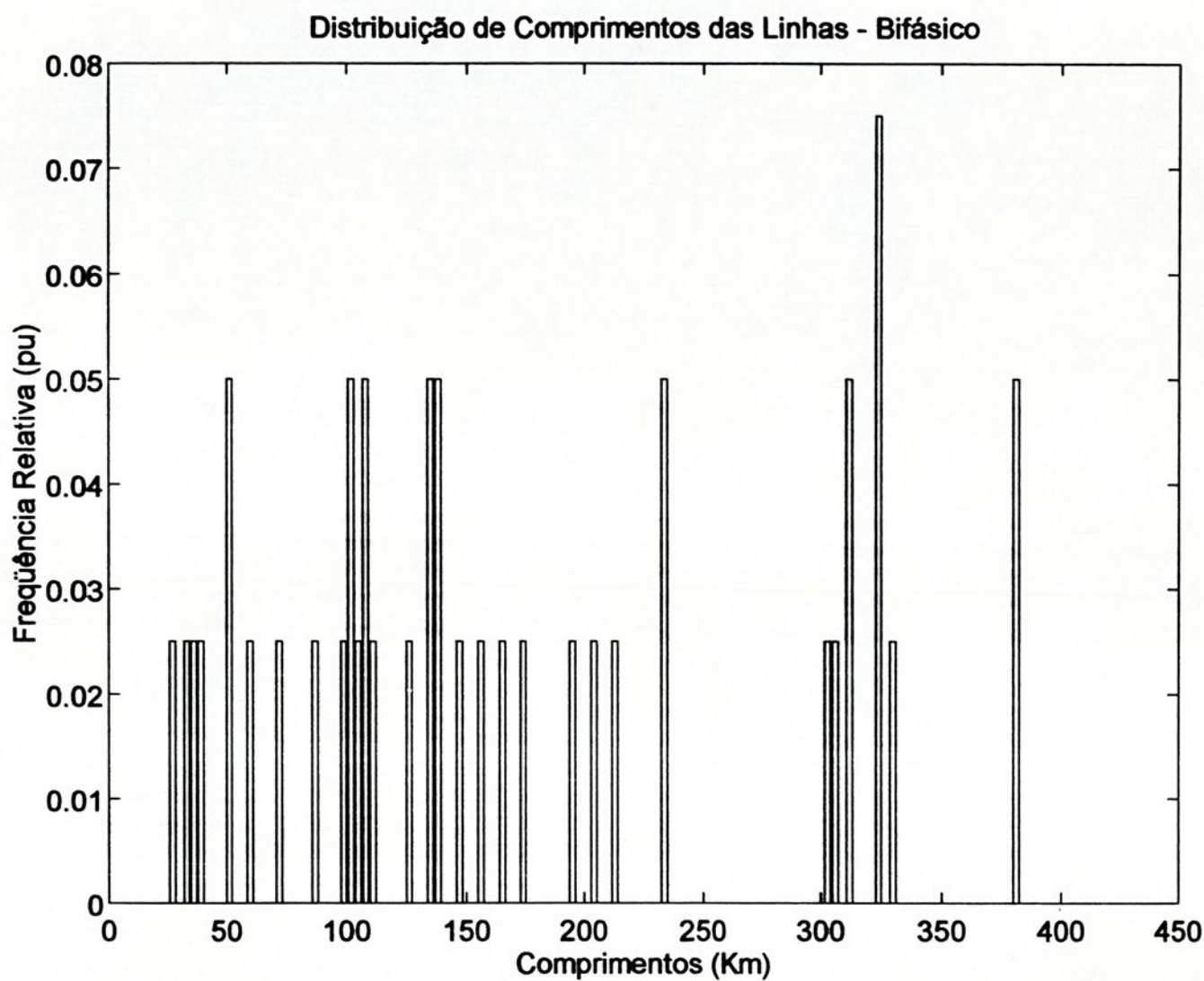


Figura V.29 - Distribuição de Comprimentos das Linhas da Rede

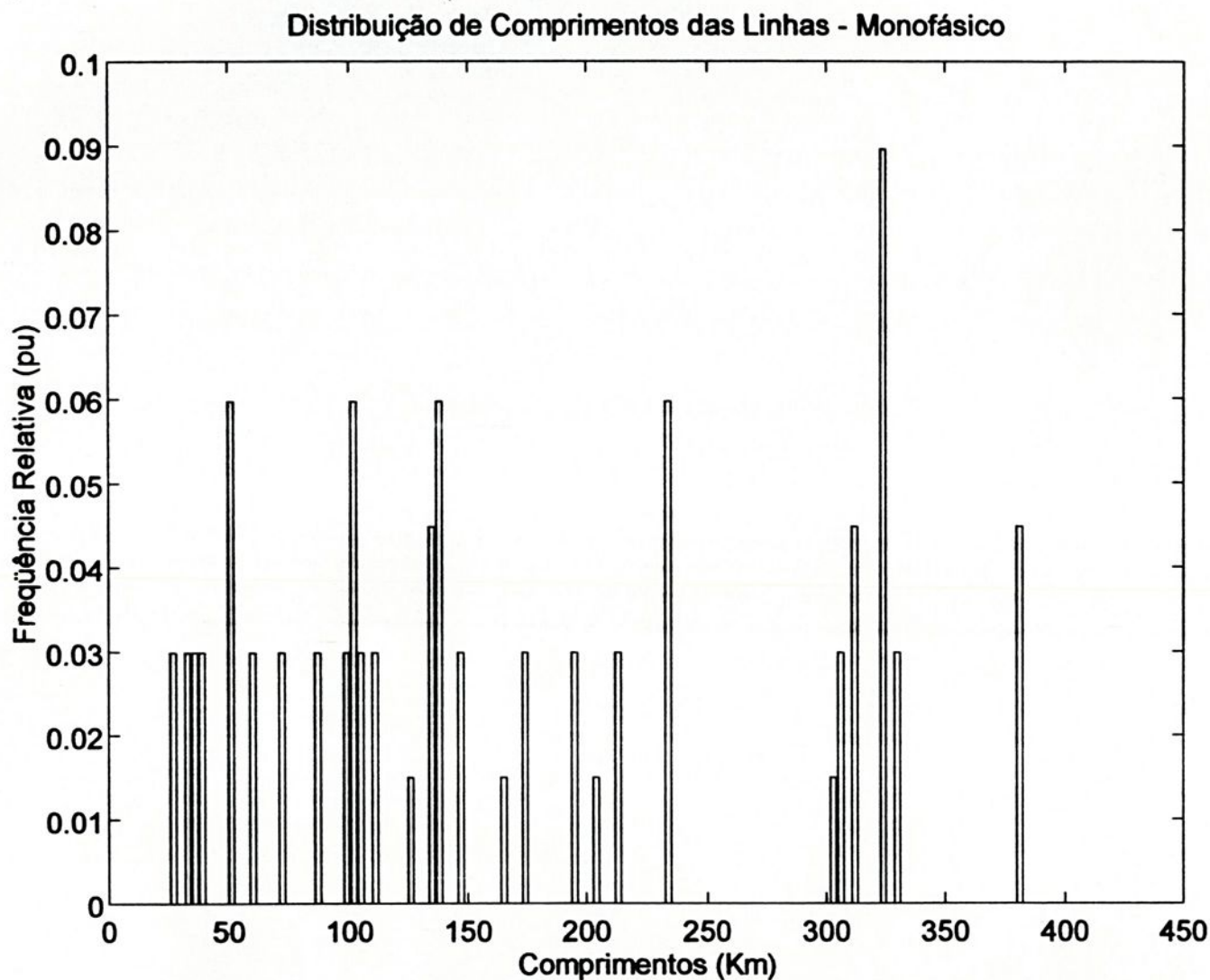


Figura V.30 - Distribuição de Comprimentos das Linhas da Rede

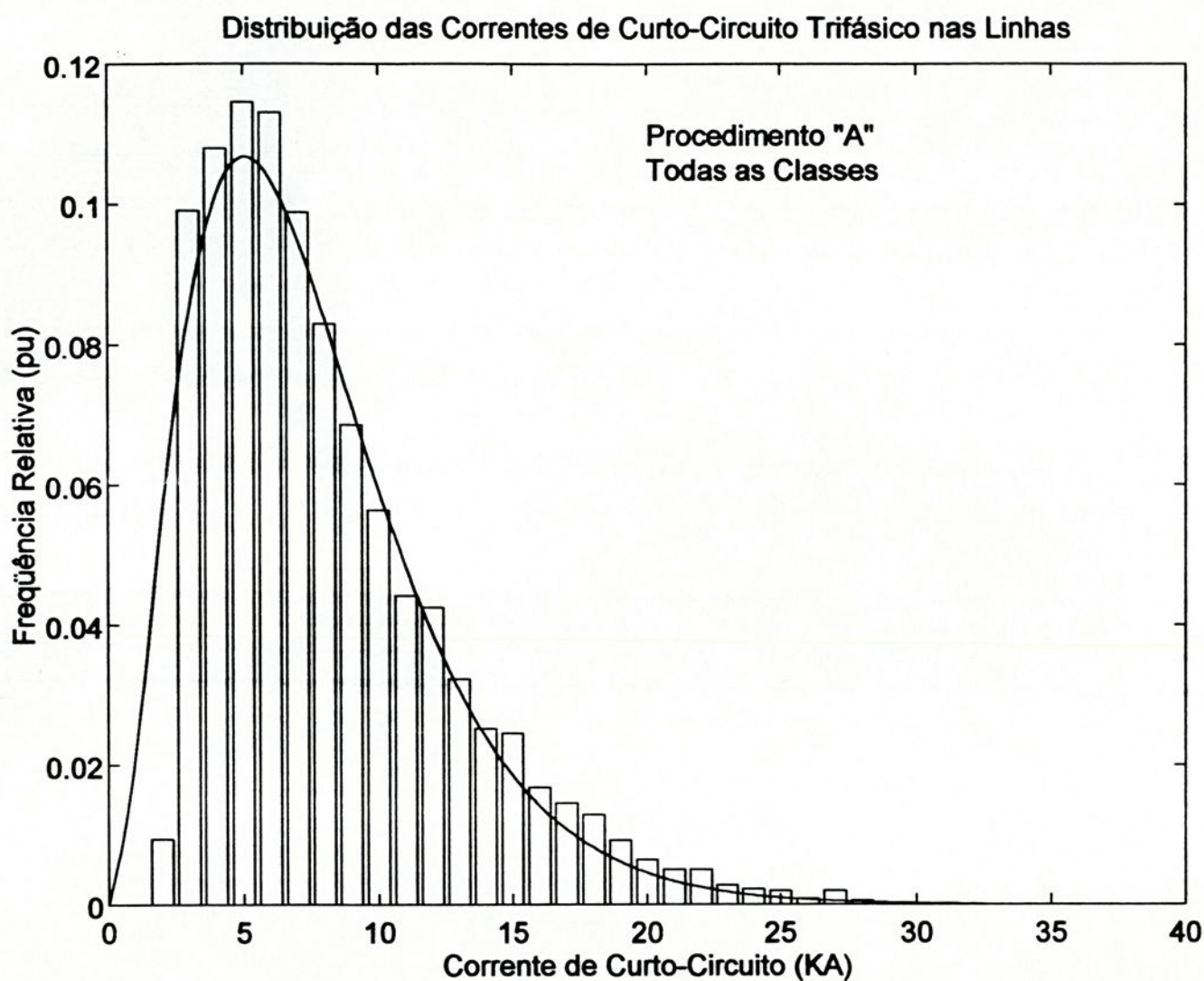


Figura V.31 - Distribuição de Correntes de Curto-Circuito Trifásicos para Falhas nas Linhas da Rede - Procedimento A

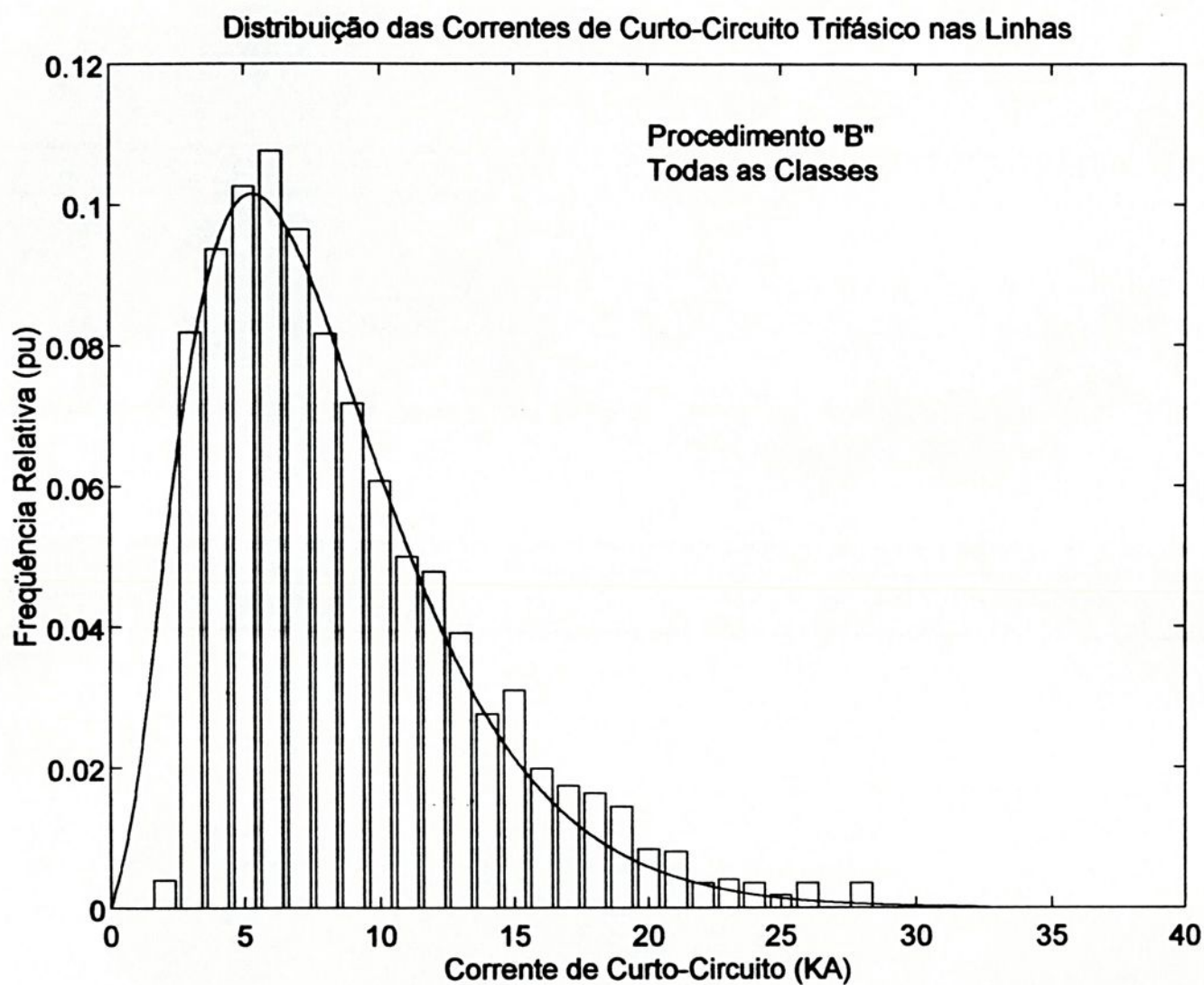


Figura V.32 - Distribuição de Correntes de Curto-Circuito Trifásicos para Faltas nas Linhas da Rede - Procedimento B

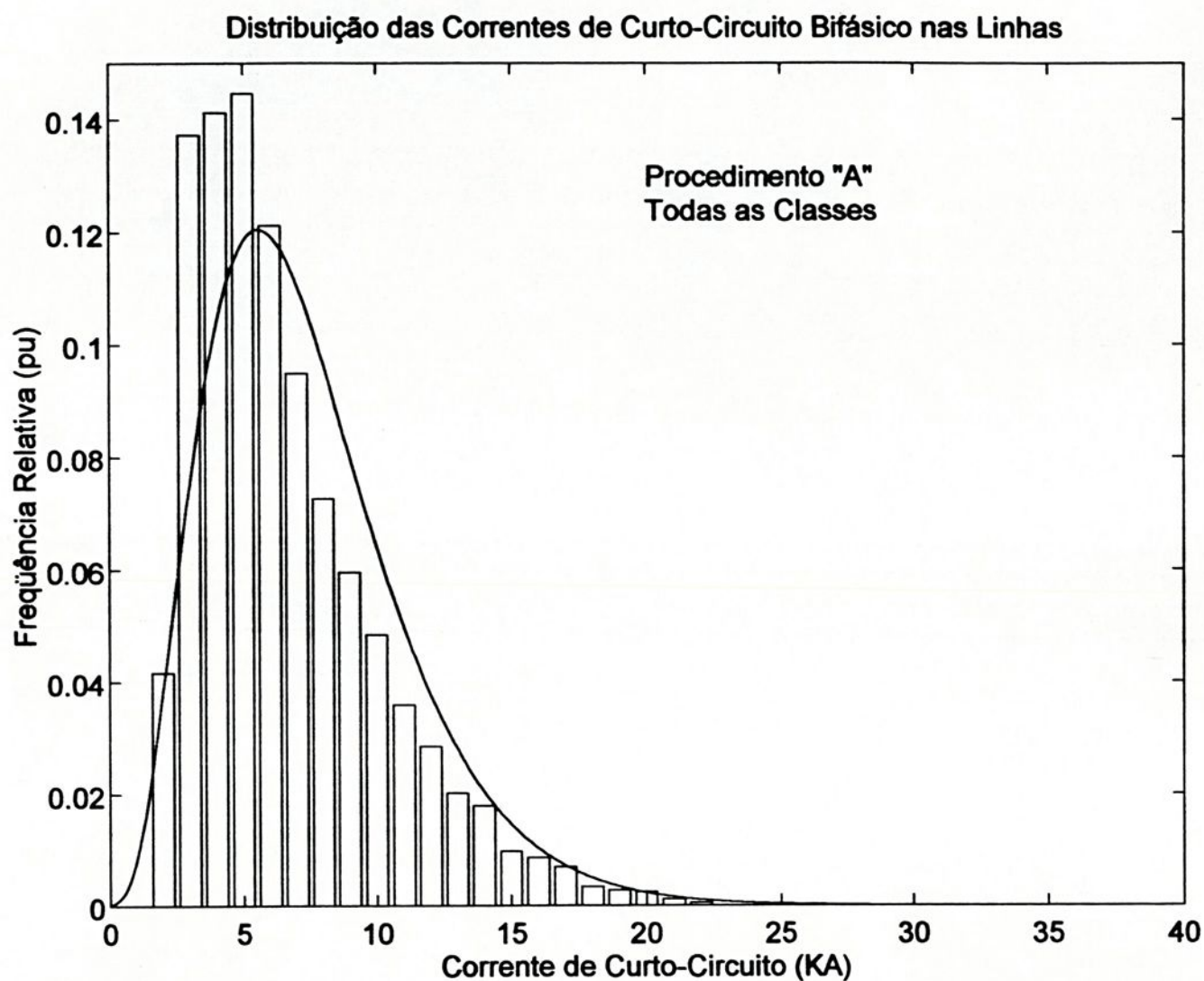


Figura V.33 - Distribuição de Correntes de Curto-Circuito Bifásicos para Faltas nas Linhas da Rede - Procedimento A

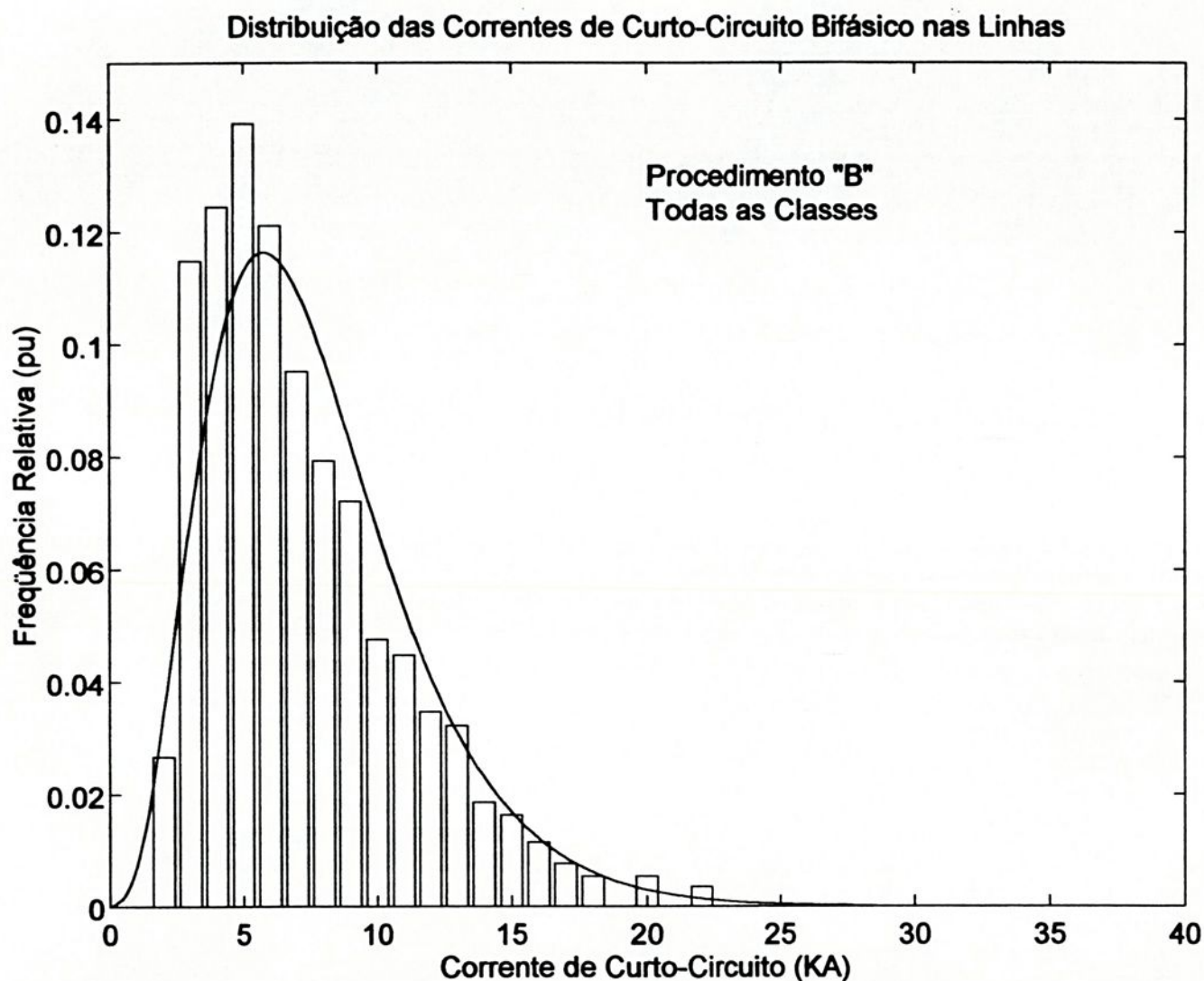


Figura V.34 - Distribuição de Correntes de Curto-Circuito Bifásicos para Faltas nas Linhas da Rede - Procedimento B

Distribuição das Correntes de Curto-Circuito Monofásico nas Linhas

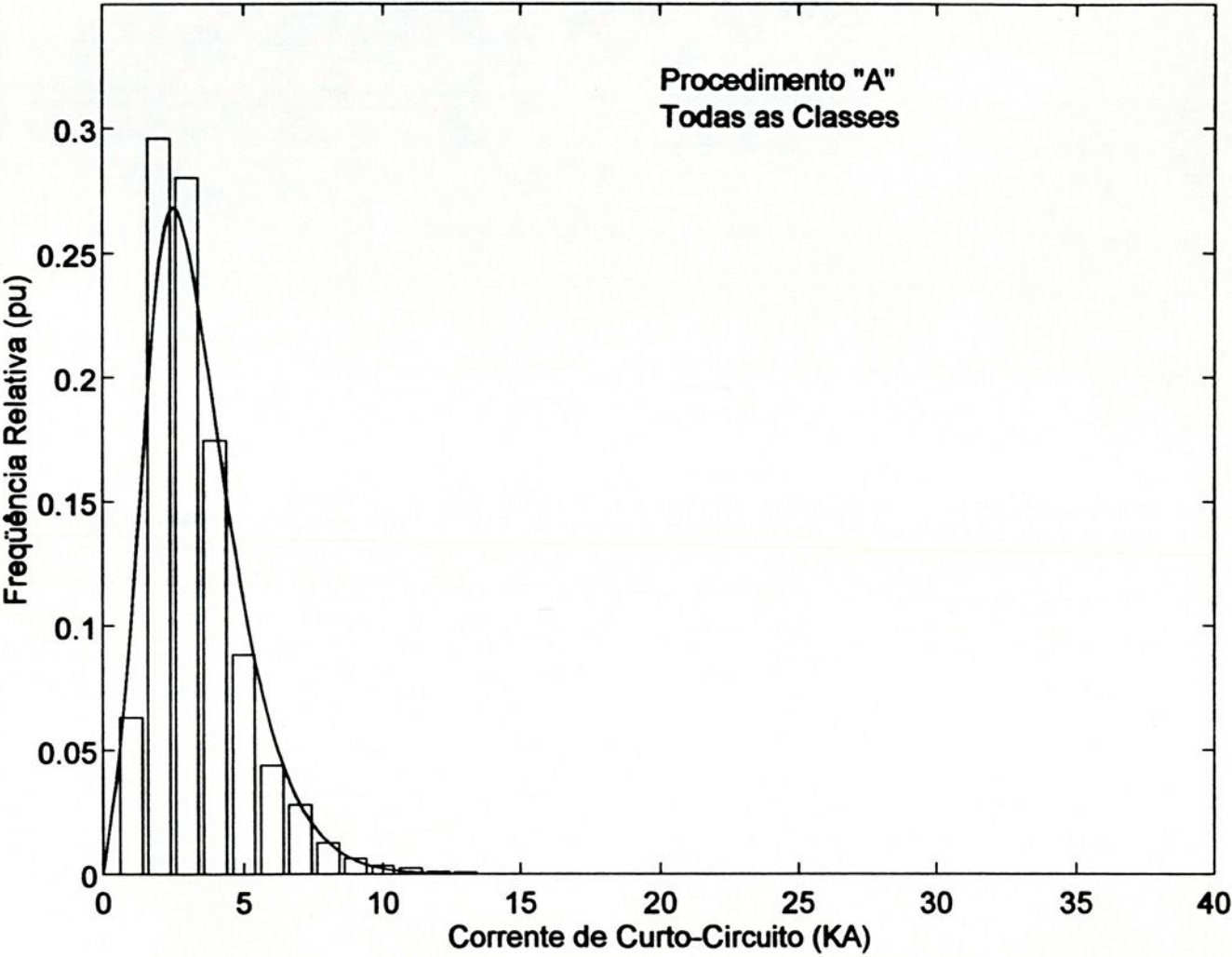


Figura V.35 - Distribuição de Correntes de Curto-Circuito Monofásicos para Faltas nas Linhas da Rede - Procedimento A

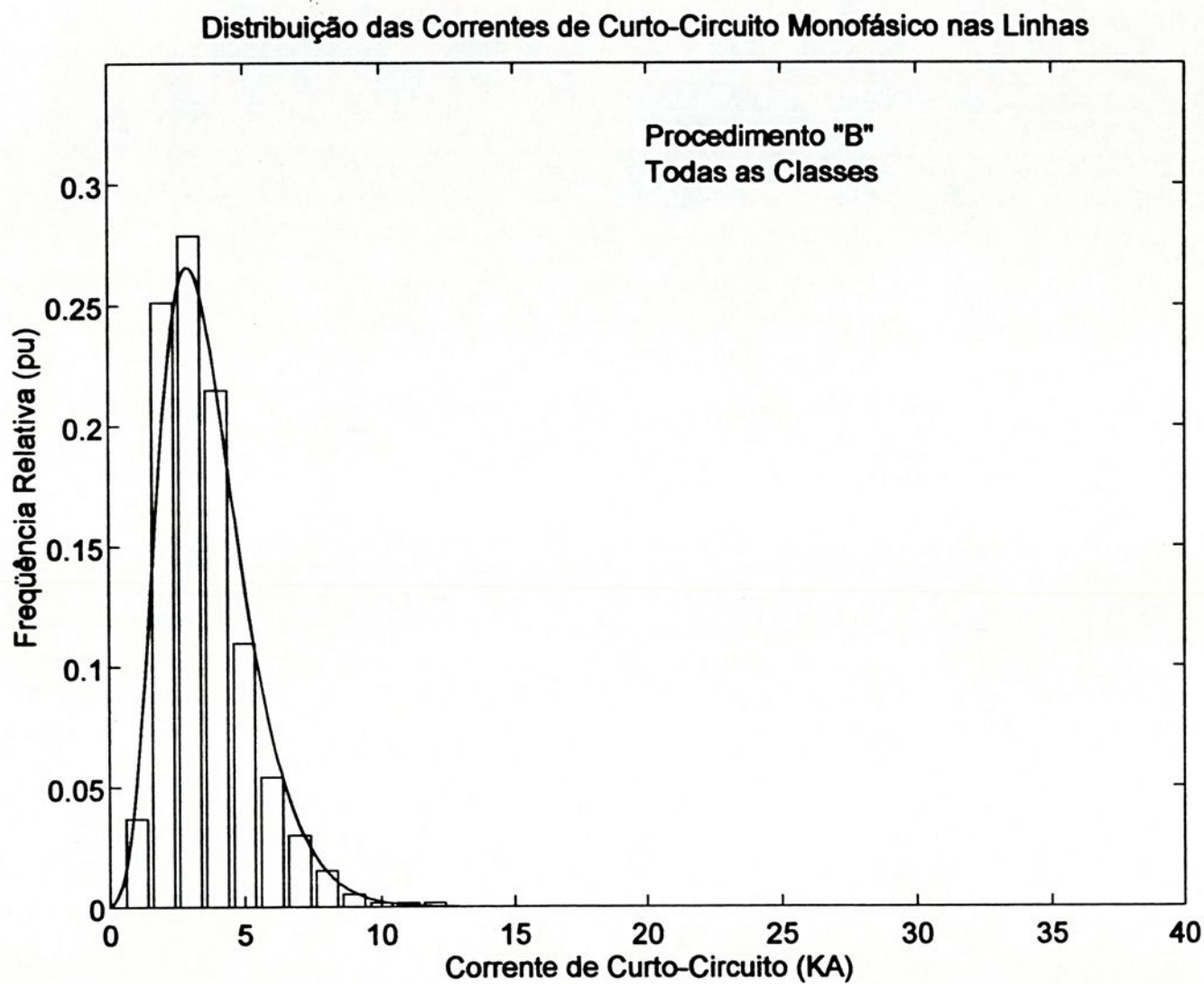


Figura V.36 - Distribuição de Correntes de Curto-Circuito Monofásicos para Faltas nas Linhas da Rede - Procedimento B

3 - ANÁLISES E CONCLUSÕES

A comparação entre as distribuições de frequências teórica e efetiva das correntes de curto-circuito nas linhas, nas figuras de V.2 a V.21, mostra que a função gama interpola muito bem os resultados experimentais.

O teste de Kolmogorov-Smirnov mostrou uma aderência de 95% para a maioria dos casos simulados.

A análise dos parâmetros experimentais, obtidos considerando abertura de linhas, mostra que para faltas trifásicas o valor médio da corrente é inferior a 23% do valor extremo superior. Para as faltas bifásicas e monofásicas os percentuais passam a ser 22% e 13% respectivamente. No caso das distribuições determinadas considerando a inserção de barra auxiliar estes percentuais assumem os valores 42%, 42% e 25% respectivamente para curtos-circuitos trifásico, bifásico e monofásico.

Observa-se ainda que os valores médios das correntes de curto-circuito deslocam-se muito pouco de seus valores medianos. Desta forma, os percentuais definidos no parágrafo anterior são superados por 50% dos defeitos nas linhas. O valor de corrente do 3^o quartil, valor superado em somente 25% dos casos, resulta em torno de 31%, 31% e 17% do valor extremo superior; respectivamente para as faltas trifásica, bifásica e monofásicas, considerando a abertura de linhas. Para a condição de inserção de barra auxiliar, estes percentuais assumem, respectivamente, os valores de 52%, 52% e 31%.

Nas figuras V.37, V.38 e V.39 estabelece-se a comparação entre as distribuições obtidas com a metodologia citada. Verifica-se que as distribuições obtidas considerando a inserção de barra auxiliar apresentam aproximações por excesso em relação às distribuições determinadas considerando a abertura de linhas e às obtidas com o método indireto.

Assim, conclui-se através dos resultados obtidos neste trabalho que os métodos podem ser considerado como ferramentas válidas para uma eventual avaliação técnica, pois se trata de métodos de fácil implementação que requerem menos tempo de processamento.



Método Direto : Abertura e Inserção X Método Indireto - Trifásico

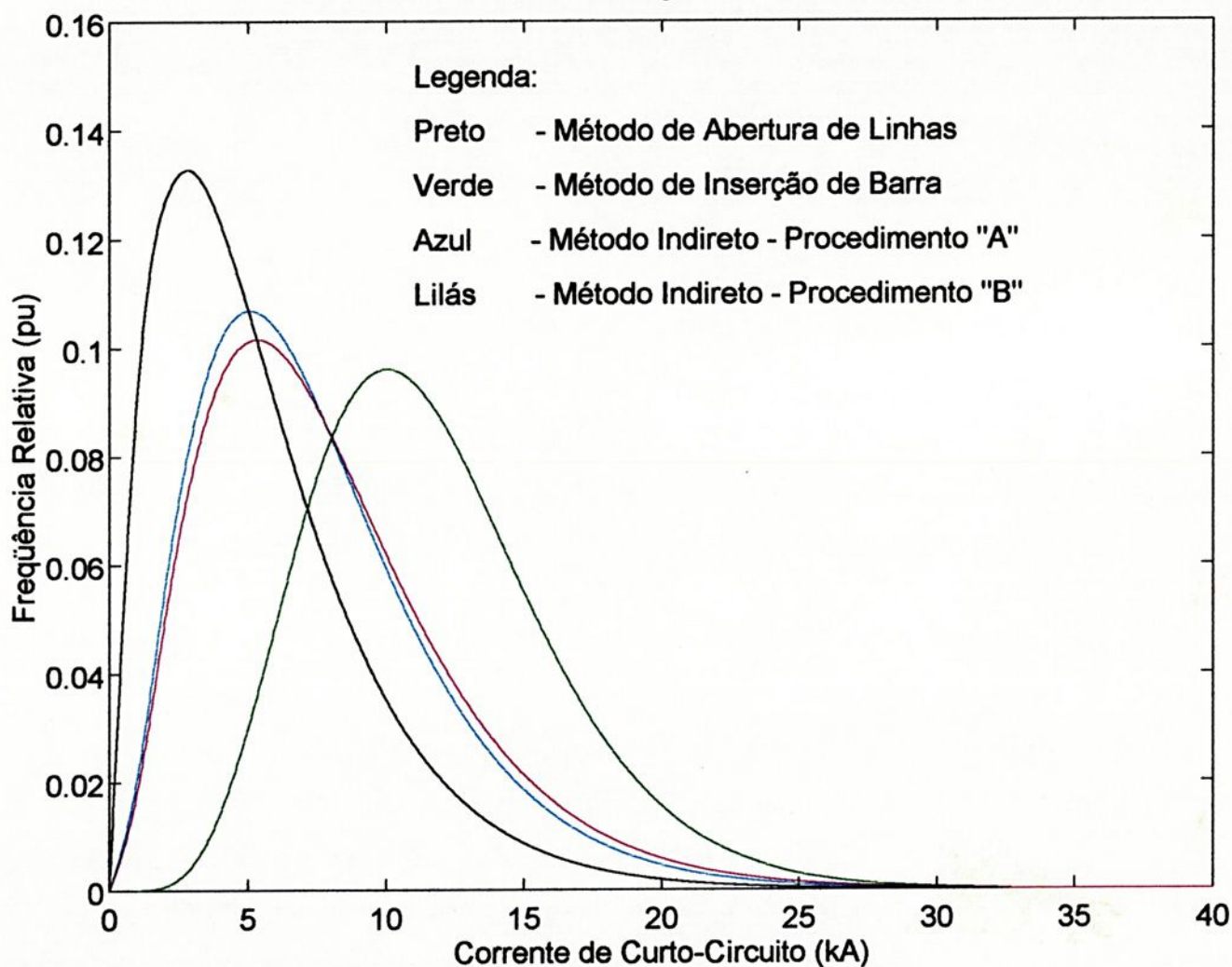


Figura V.37 - Comparação entre as Distribuições de Correntes de Curto-Circuito nas Linhas obtidas com os Métodos Direto e Indireto

Método Direto : Abertura e Inserção de Barra X Método Indireto - Bifásico

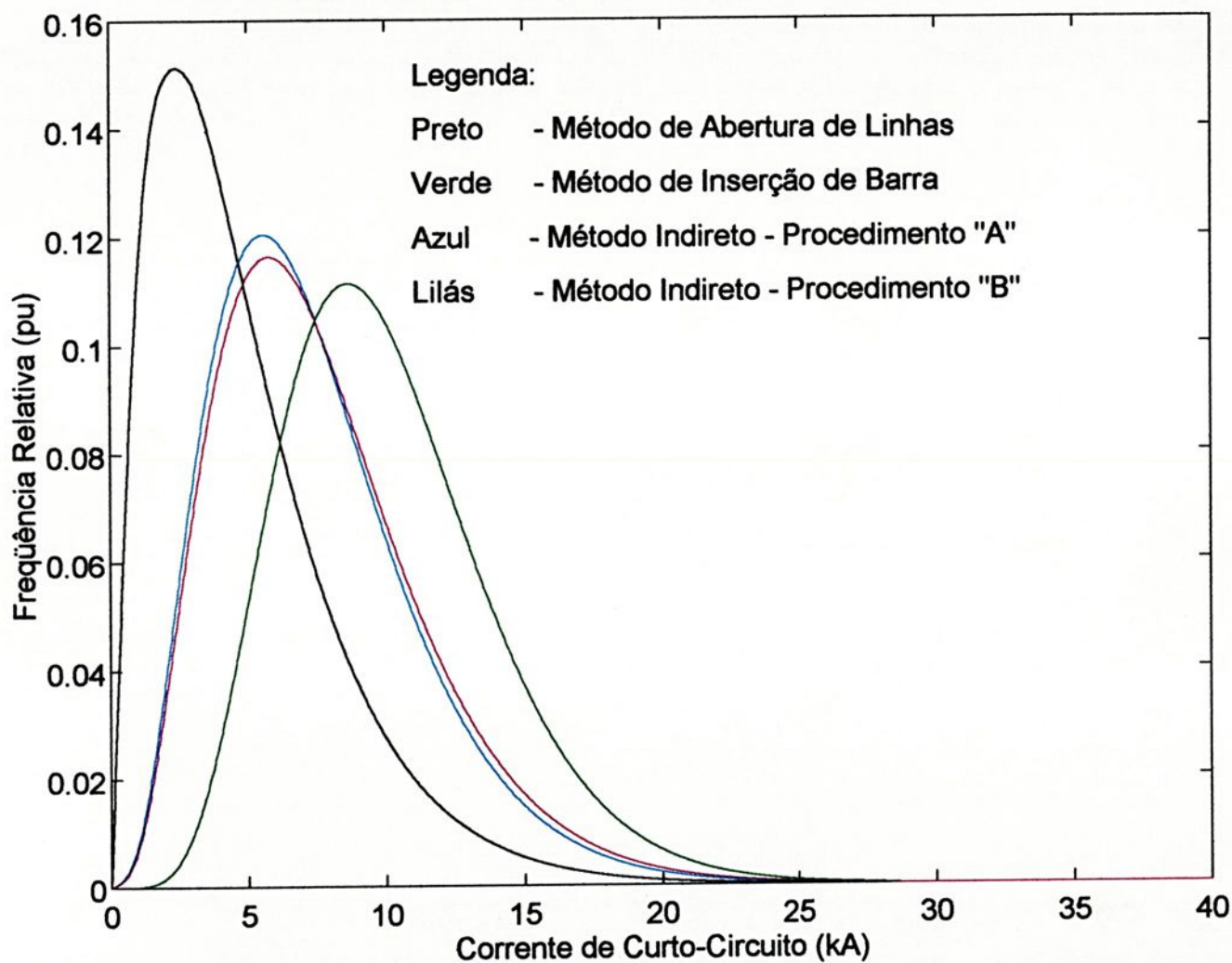


Figura V.38 - Comparação entre as Distribuições de Correntes de Curto-Circuito nas Linhas obtidas com os Métodos Direto e Indireto

Método Direto : Abertura e Inserção X Método Indireto - Monofásico

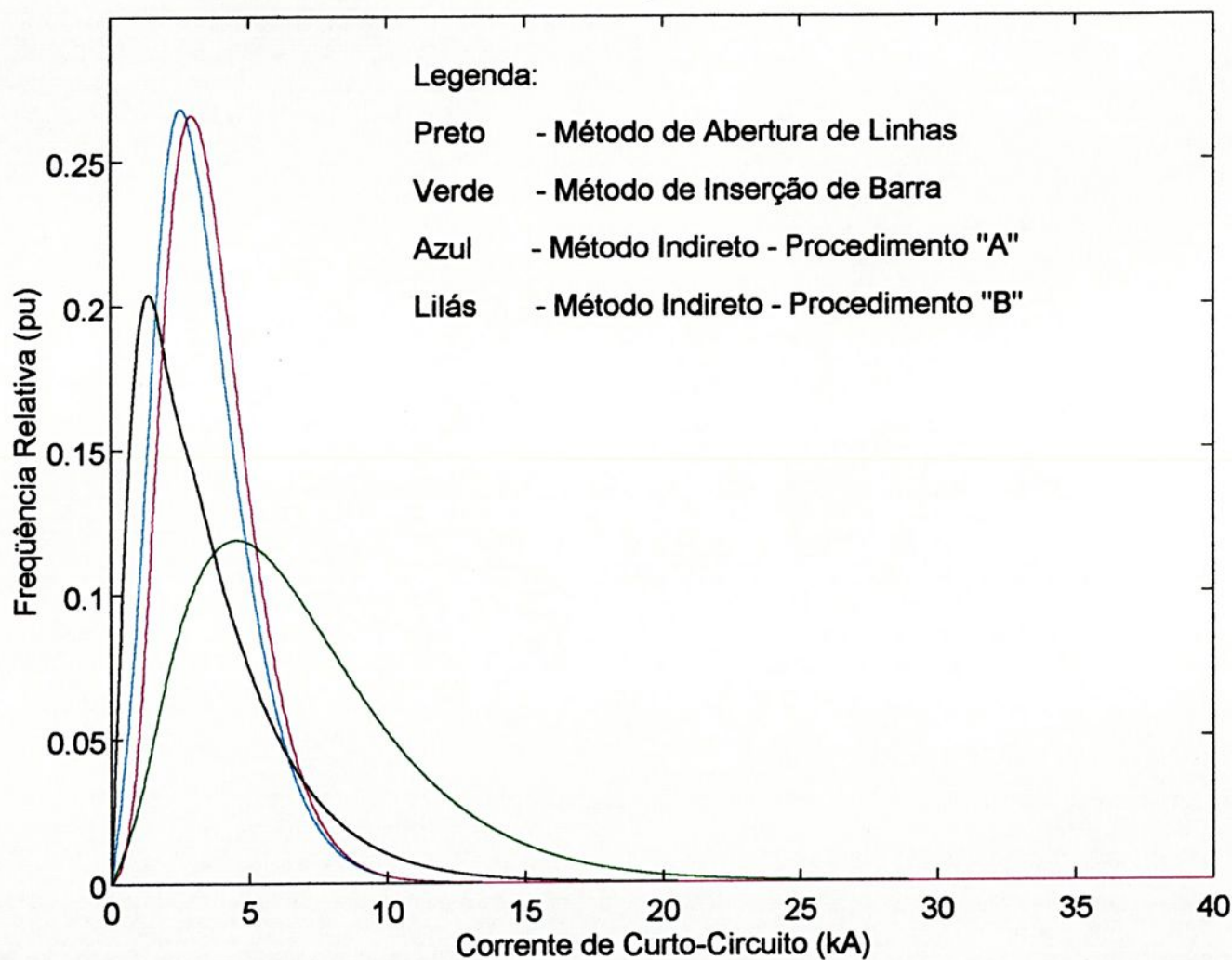


Figura V.39 - Comparação entre as Distribuições de Correntes de Curto-Circuito nas Linhas obtidas com os Métodos Direto e Indireto

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram implementados métodos que podem ser utilizados para melhorar critérios de especificação de equipamentos de subestações, tais como, disjuntores, barramentos, transformadores de corrente e potência, chaves seccionadoras, entre outros.

Nos trabalhos [01, 06, 08, 10 e 16] foram desenvolvidas ferramentas, com objetivos que podem ser considerados semelhantes aos proposto neste trabalho, podendo assim chamar a atenção para alguns aspectos dos métodos implementados e citados anteriormente, com o objetivo de destacar suas potencialidades e deficiências.

No método direto, a simulação de curtos-circuitos ao longo das linhas tem como objetivo determinar os níveis de corrente de falta e sua frequências, seja para uma linha individualmente ou para um conjunto delas. As distribuições obtidas são aquelas que podem ser utilizadas nos dimensionamentos de componentes de subestações.

O método indireto busca o levantamento da função de distribuição acumulada da variável casual corrente de curto-circuito nas linha. A variável corrente pré-fixada assume valores entre os valores extremos de correntes de faltas que podem ocorrer no sistema, definindo desta forma a distância entre a barra de alimentação e um ponto além do qual a variável casual corrente de curto-circuito é menor que o valor pré-fixado. Nos trabalhos [01] e [16] este valor de corrente arbitrado é função do estado do sistema, linha sob falta e tipo de falta. Caso o valor da corrente seja alterado, os coeficientes da equação polinomial cuja incógnita é a variável que representa a localização da falta, também sofrerão alterações.



Isto pode representar o cálculo dos coeficientes em cada ponto de falta ao longo de uma mesma linha e em consequência a resolução de uma outra inequação. Caso o valor de corrente arbitrado seja fixado em seu valor máximo esperado, cada linha terá uma inequação para cada tipo de falta. Os coeficiente destas inequações, definidos por expressões “quilométricas”, são determináveis conhecendo-se as componentes real e imaginária de tensões pré-falta, as componentes real e imaginária das impedâncias das barras e linhas envolvidas e da corrente arbitrada. Assim supõe-se que um estudo de fluxo de carga deva fornecer os valores de tensão pré-falta para todas as barras do sistema. Caso isto não ocorra, tem-se um equacionamento ricamente detalhado com as tensões nas barras arbitradas conforme simplificações usuais nestes estudos.

Ao considerar-se que as grandezas corrente de falta na barra e o comprimento da linha são independentes entre si, estamos criando condições para com base na teoria das probabilidades estabelecer expressões da função de distribuição acumulada. É evidente que esta hipótese introduz imprecisão nos resultados, mas exige um número bem menor de operações, menor requisito de memória e maior rapidez na apresentação dos resultados.

No trabalho [11], observando-se os resultados gerados pelo método de Monte Carlo, verifica-se que a forma da função densidade de probabilidade se aproxima de uma função Gama, reforçando a contribuição dada pelo trabalho, neste sentido. É importante observar que dispor da distribuição densidade de probabilidade da corrente de falta representada por uma função Gama em lugar de uma tabela, além de ser uma solução mais elegante, permite calcular analiticamente a probabilidade de falha, quando do dimensionamento de barramentos de subestações.

O detalhamento de formulações, nem sempre representam a modelagem mais adequada. Esta representação minuciosa exige maiores esforços computacionais e proporcionam melhores resultados, entretanto, algumas simplificações podem reduzir estes esforços e produzir bons resultados sob o ponto de vista prático.

Deste modo as simplificações introduzidas poderão ser descartadas caso fique demonstrado que os resultados com formulações mais simples apresentem erros grosseiros. Caso isto se confirme, pode-se ainda combinar métodos, procedimentos e simplificações em busca de melhores formulações. Todos os métodos tem a mesma finalidade que é possibilitar projetos mais econômicos para sistemas de potência. Dentre os citados, os propostos neste trabalho, se destacam por exigir um menor esforço computacional.

Na engenharia de potência, o impacto das considerações probabilísticas para o curto-circuito aparece principalmente na especificação dos diferentes componentes citados.



A definição de disjuntores é feita com base em um conjunto de valores de tensão que aparecem devido a manobra e descargas atmosféricas e um conjunto de valores de corrente dentre os quais a corrente nominal e a capacidade de interrupção nominal de curto-circuito aparecem como grandezas determinantes. A capacidade de interrupção nominal em curto-circuito é expressa pela valor eficaz da componente alternada e pela porcentagem da componente contínua, determinável se conhecida a constante de tempo do circuito.

É recomendado que o disjuntor suporte as solicitações impostas pelas condições em caso de falta, considerando-se as correntes de curto-circuito no local previsto para instalação do disjuntor.

O disjuntor é testado para a sua corrente de interrupção de placa, mas não há garantia de que ele suporte uma corrente maior. O grande problema é mecânico, advindo da pressão em virtude da expansão dos gases gerados pelo arco elétrico. Como o disjuntor pode explodir e na falta de qualquer critério, o projetista sempre dá uma folga de 20 a 30% no dimensionamento da corrente de interrupção de todos os disjuntores do sistema. Os transformadores também são especificados com folga, devido as suas características construtivas, assim como todos os equipamentos citados no texto. Há também folga na definição dos esforços mecânicos sobre os distanciadores das linhas de transmissão.

Com a redução dessas folgas, o projeto do sistema sofrerá um grande impacto econômico. Tal redução, e em certos casos a eliminação, pode ser feita com apoio nos estudos estatísticos desenvolvidos. O projetista sabendo a frequência com que poderão ocorrer as grandes correntes, estará muito mais seguro para otimizar projetos com dimensionamentos mais justos e econômicos.

Um outro impacto muito importante se dará na definição dos esquemas de manutenção preventiva, podendo haver sensível redução das paradas programadas no caso de se saber a frequência das grandes solicitações.

No estoque de equipamentos poderá haver reflexo para substituição, com aumento da vida útil esperada.



2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando-se os resultados obtidos nesta dissertação, são sugeridos alguns tópicos para trabalhos futuros, com o objetivo de um maior aperfeiçoamento do assunto e eliminação das deficiências das ferramentas apresentadas até o presente momento:

- Estudo comparativo entre metodologias apresentadas neste trabalho e outras existentes, por exemplo, Método de Monte Carlo;
- Estudo de dimensionamento dos equipamentos : metodologia convencional x metodologia proposta;
- Estudo custo / benefício das metodologias existentes.

3 - DIVULGAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho de dissertação de Mestrado foi divulgado nos seguintes eventos científicos:

Bovolato, L.F., Duran J.R. "Determinação da Distribuição de Probabilidade da Corrente de Falta Simétricas e Assimétricas ao Longo de Linhas de Transmissão". Artigo apresentado e publicado nos anais do 9º CEDE'96 (Congresso e Exposição Internacional de Energia Elétrica), realizado de 23 a 27 de setembro de 1996, Prédio Ferial de Palermo, Buenos Aires, Argentina.

Bovolato, L.F., Duran J.R. "Uma Contribuição para a Determinação da Distribuição de Probabilidade da Corrente de Curto-Circuito ao Longo de Linhas de Transmissão". Artigo apresentado e publicado nos anais do II Congresso Latinoamericano de Distribución de Energia Elétrica, realizado de 02 a 04 de outubro de 1996, Valparaíso, Chile.



- [01] Balouktsis, A. ; Tsanakas, D. K. ; Vachtsevanos, G. "Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Simulations and Analytical Methods", IEEE Trans. on PAS, vol PWR-1, n.3, August 1986, pp 135-141.
- [02] Bovolato, L.F., Ribeiro, F.S., Galvão, L.C.R. "Determination and Statistical Treatment of Short-Circuit Currents For Faults On Lines Of Network Of 440 kV Cesp System. In: 38th Midwest Symposium On Circuits And System, Rio de Janeiro, August / 1995.
- [03] Bovolato, L.F., Ribeiro, F.S., Galvão, L.C.R. "Correntes de Curto-Circuito para Falhas nas Linhas da Rede de 440 kV do Sistema CESP - Método Analítico. In: XI Congresso Chileno de Ingenieria Electrica, Punta Arenas, Nov / 1995.
- [04] Brown, H.E. "Solution of Large Network by Matrix Methods", second edition, Cary/North Carolina, A Wiley- Interscience Publication, 1985.
- [05] Costa Neto, P.L.O. "Estatística", primeira edição, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1977.
- [06] El-Kady, M.A. "Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Simulations". In :IEEE Trans on Pas, (102): 1308-1326, 1983.
- [07] El-Kady, M.A. "A Partitioned Polynomial Integration Algorithm for Failure Probability Evaluation". In :Proceedings of the IEEE, vol 72, n.5, may 1984.
- [08] El-Kady, M.A., Ford, G.L. "An Advanced Probabilistic Short-Circuit Program". In: IEEE Trans on Pas, (102): 1240-1248, 1983.
- [09] El-Kady, M.A., Hotte, P. W., and Vainberg, M. Y. "Probabilistic Assessment of Step and Touch Potentials Near Transmission Lines Structures". In :IEEE Trans on Pas, (102): 640-645, march 1983.
- [10] Ford, G.L., Sengupta, S.S. "Analytical Methods for Probabilistic Short-Circuit Studies". In: Electric Power System Research, 1(5): 13-20, Mar 1982.



- [11] Ford, G.L., Srivastava, K.D. "The Probabilistic Approach to Substation Bus Short Circuit Design". In: Electric Power System Research, 3(4): 191-200, Jul 1981.
- [12] Germani, M.D., Ford, G.L., Neudorf, E. G., Vainberg, M., El-Kady, M.A., Ganton, R.W.D. "Probabilistic Short-Circuit Upgrading of Station Strain Bus System-Overview and Application". In: IEEE Trans on PWRD, (PWRD-1): 111-117, 1986.
- [13] Havard, D. G., Pon, C.J., Ewing, H.A., Dumol, G.D., Wong, A.C. "Probabilistic Short Circuit Upgrading of Station Strain Bus System-Mechanical Aspects". In: IEEE PES Winter Meeting, Paper 86 WM: 123-4, New York, 1986.
- [14] Hehl, M. E. "Linguagem de Programação Estruturada: Fortran 77 ". São Paulo, Editora Mc Graw Hill, 1986.
- [15] Meyer, P.L. "Probabilidade - Aplicações à Estatística", primeira edição, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1977.
- [16] Papadimas, B. C. ; Hatziargyriou, N. D. e Tsanakas, D. K. "Global Probabilistic Index of System Fault Contingencies". In: CIGRE International Conference, Paris, 1988.
- [17] Ramani, N., Wang, L., Tanaka, W.H, Macedo, F.X. "Probabilistic Short Circuit Upgrading of Station Strain Bus System - Reliability and Operating Considerations". In: IEEE PES Winter Meeting, Paper 86 WM: 127-5, New York, 1986.
- [18] Sato, F., Garcia, A.V., Monticelli, A. "Parallel Implementation Short-Circuit Analysis by the Monte Carlo Approach ". In: IEEE Trans on Power System, Vol 9, nº2, May 1994.
- [19] Schilling, M. Th., Silva, A.M.L., Billinton, R., El-Kady, M.A. "Bibliography on Power System Probabilistic Analysis (1962-1988) . In: IEEE Trans on Power System, Vol 5, nº1, Feb 1990.
- [20] Vainberg, M., El-Kady, M.A., Ford, G.L., Ganton, R.W.D., Germani, M.D., Neudorf, E.G. "Probabilistic Short Circuit Upgrading of Station Strain Bus System - Probabilistic Formulation". In: IEEE Trans on PWRD, vol. PWRD-1: 129-136, 1986



1 - DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DE INSERÇÃO DE BARRA

Inicialmente é desenvolvido o cálculo da matriz impedância de barra e os elementos desta matriz são utilizados na técnica de inserção de barras.

Tem-se uma representação a seguir:

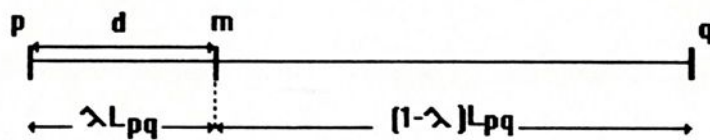


Figura VIII.1 - Posição de falta na linha.

Os elementos da matriz impedância de barra Z^b , após a adição da nova barra, são calculados a partir dos elementos de Z . As impedâncias de linhas (p,m) e (m,q) são:

$$Z_{pm} = \lambda Z_{pq} \quad (\text{VIII-1})$$

$$Z_{mq} = (1 - \lambda) Z_{pq} \quad (\text{VIII-2})$$

O acoplamento mútuo com uma linha genérica ij pode ser representado por:

$$Z_{pm,ij} = \lambda Z_{pq,ij} \quad (\text{VIII-3})$$

$$Z_{mq,ij} = (1 - \lambda) Z_{pq,ij} \quad (\text{VIII-4})$$

Analogamente para a linha (m,j), tem-se:

$$\frac{V_j - V_m}{1 - \lambda} = z_{ij} I_{ij} + \sum_{pq} z_{ij,pq} I_{pq} \quad (\text{VIII-10})$$

Da relação (VIII-9) e (VIII-10):

$$\frac{V_m - V_i}{\lambda} = \frac{V_j - V_m}{1 - \lambda} \rightarrow V_m = (1 - \lambda) V_i + \lambda V_j \quad (\text{VIII-11})$$

Dividindo os membros da equação (VIII-11) por I_v , tem-se:

$$\frac{V_m}{I_v} = (1 - \lambda) \frac{V_i}{I_v} + \lambda \frac{V_j}{I_v} \quad (\text{VIII-12})$$

Da relação (VIII-7) e (VIII-12), pode-se escrever que:

$$Z_{mv}^b = (1 - \lambda) z_{iv} + \lambda z_{jv} \quad (\text{VIII-13})$$

Para Z_{mm}^b , pode-se escrever:

$$Z_{mm}^b = \frac{V_m}{I_m} \bigg|_{I_n=0}, \quad \forall_n \neq m \quad (\text{VIII-14})$$

Da figura VIII.3 segue que:

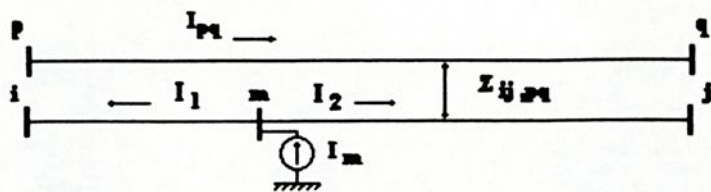


Figura VIII.3 - Definições de $V_m - V_i$ e $V_m - V_j$.

$$V_m - V_i = \lambda z_{ij} I_1 - \sum_{pq} z_{ij,pq} I_{pq} \quad (\text{VIII-15})$$

$$V_m - V_j = (1-\lambda) z_{ij} I_2 - \sum_{pq} (1-\lambda) z_{ij,pq} I_{pq} \quad (\text{VIII-16})$$

Multiplicando as relações (VIII-15) por $(1-\lambda)$ e (VIII-16) por λ e adicionando por partes, resulta em:

$$V_m - (1-\lambda)V_i - \lambda V_j = \lambda (1-\lambda) z_{ij} I_m \quad (\text{VIII-17})$$

$$\frac{V_m}{I_m} = (1-\lambda) \frac{V_i}{I_m} + \lambda \frac{V_j}{I_m} + \lambda (1-\lambda) z_{ij} \quad (\text{VIII-18})$$

Substituindo V_i / I_m e V_j / I_m das relações (VIII-12) e (VIII-13), resulta:

$$Z_{mm}^b = (1-\lambda)^2 Z_{pp} + \lambda^2 Z_{qq} + 2\lambda(1-\lambda)Z_{pq} + \lambda(1-\lambda)Z_{pq} \quad (\text{VIII-19})$$

2 - DESENVOLVIMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES DE FALTAS NAS LINHAS

De posse dos parâmetros elétricos específicos de uma determinada linha e do valor da corrente de curto-circuito I do único nó que alimenta, pode-se determinar o módulo da corrente de falta i em cada ponto examinado da linha através da expressão (VIII-20) fornecida a seguir:

$$i = \frac{hV}{Z_e + az^1 D} \quad (\text{VIII-20})$$

sendo:

V - tensão de fase no nó de alimentação da linha;

Z_e - impedância equivalente de curto-circuito, vista pelo nó ⁽¹⁾;

z^1 - impedância de seqüência positiva da linha por unidade de comprimento ⁽¹⁾;

z^0 - impedância de seqüência zero da linha por unidade de comprimento ⁽¹⁾;

D - distância do ponto de defeito à barra de alimentação;

a, h - coeficientes que dependem do tipo de defeito examinado, sendo $h = 1$ e

$a = \left[2 + \frac{z^0}{z^1} \right] / 3$, para falta fase-terra.

NOTA:

(1) - Como a componente resistiva da impedância é muito menor que a componente reativa, aquela é em geral desprezada e assim as tensões e correntes podem ser tratadas como grandezas reais.

Conhecida a corrente de falta I na barra, pode-se obter a impedância equivalente Z_e da rede vista pela barra através da relação:

$$Z_e = \frac{V}{I} \quad (\text{VIII-21})$$



Substituindo-se a relação (VIII-20) na expressão (VIII-21) e fazendo $c = z^1 / V$, obtém-se:

$$i = \frac{hI}{1 + aIcD} \quad (\text{VIII-22})$$

Uma vez fixada a corrente I de falta na barra de alimentação é possível calcular, para cada valor de corrente de defeito i em pontos ao longo da linha, a distância d_o entre a posição da falta e a barra de alimentação, além da qual a corrente de defeito na linha ($i_D > d_o$) é menor do que a corrente i pré-fixada.

Rearranjando-se a expressão (VIII-22), obtém-se a expressão (VIII-23) através da qual pode-se determinar a distância d_o .

$$d_o = \frac{1}{ac} \left[\frac{h}{i_{\text{pré-fix.}}} - \frac{1}{I} \right] \quad (\text{VIII-23})$$

Para faltas fase-terra a corrente I é considerada como sendo igual a corrente de defeito fase-terra no nó.

A impedância equivalente Z_e , para o caso de faltas fase-terra, esta assume valor igual a $(2z^1 + z^0) / 3$, sendo z^0 a impedância nodal de seqüência zero vista pelo nó.

A curva que define o andamento da corrente de falta na linha i na medida em que se varia o comprimento D é dada pela relação (VIII-22) e encontra-se representada na figura VIII.4. Observa-se na figura a indicação, em correspondência a um valor de corrente de falta na linha i , o ponto P_o que define a distância d_o .



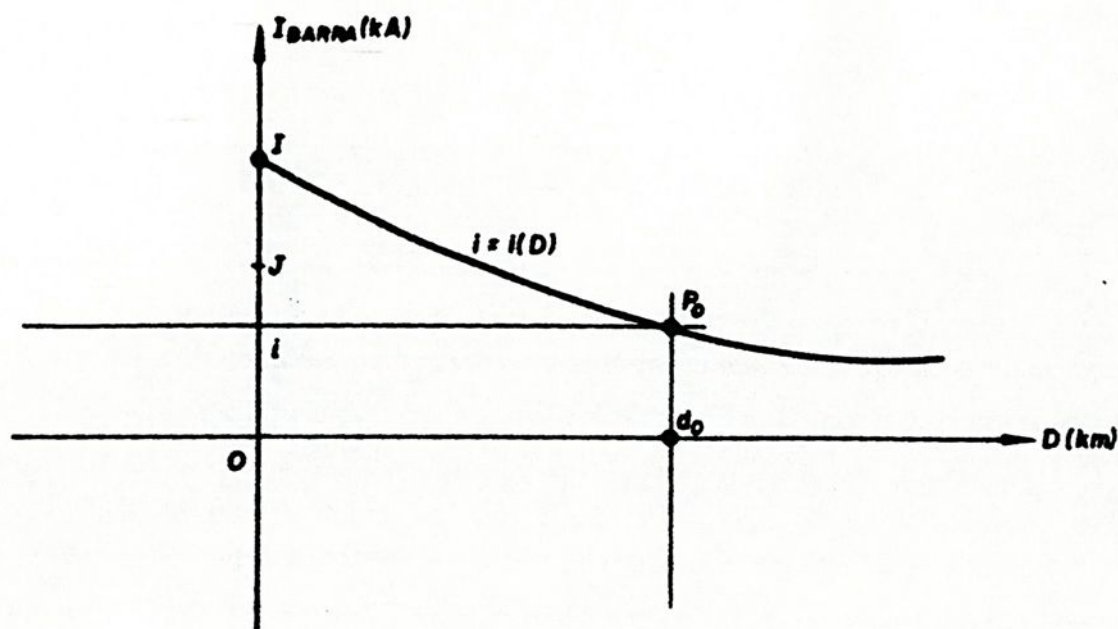


Figura VIII.4 - Comportamento da corrente de defeito na linha, resultante da variação da distância do ponto de falta à barra de alimentação.

A partir da fig.VIII.4, considere a necessidade de obter-se a probabilidade de ocorrer um valor de corrente de defeito J na linha maior do que um dado valor i pré-fixado, tendo ocorrido um valor de corrente de falta I na barra a ela ligada. Considere ainda que o comprimento D da linha seja constituído por um número γ de segmentos de comprimento ΔD , isto é, $D = \gamma \Delta D$ e que o valor de i pré-fixado tenha definido um ponto P_0 tal que $d_0 = \delta \Delta D$, sendo γ e δ inteiros e positivos.

A verificação de ocorrência da condição $J > i$ com $i < J \leq I$ pode ser realizada para cada ponto ao longo do comprimento da linha definidos por múltiplos inteiros de ΔD . Assim procedendo, até o ponto P_0 , observa-se que são realizadas δ verificações nas quais ocorram δ vezes a condição $J > i$. Continuando com o processo, para além do ponto P_0 , até o final do comprimento D da linha, observa-se que são feitas γ verificações nas quais ocorre $\gamma - \delta$ vezes a condição $J < i$ e nenhuma vez a condição $J > i$. Desta forma, até o ponto P_0 , a probabilidade da condição $J > i$ acontecer é δ/δ , enquanto que, considerando o comprimento total, a probabilidade da condição $J > I$ acontecer será δ/γ . Assim, multiplicando-se o numerador e o denominador desta última relação por ΔD , resulta d_0 / D .

Fundamentado nestas colocações pode-se escrever que indicando por J a variável casual *corrente de defeito na linha*, a condição $J > i$ com $i < J \leq I$ fica satisfeita para todas linhas de comprimento $D \leq d_0$ com probabilidade de 1, enquanto que, a mesma condição é satisfeita pelas linhas de comprimento $D > d_0$ limitadamente pela fração d_0 / D com probabilidade coincidente com o valor da mesma relação, isto é:

$$P \{J > i / I, D\} = \begin{cases} 1, \text{ para } D \leq d_0 \\ \frac{d_0}{D}, \text{ para } D > d_0 \end{cases} \quad (\text{VIII-24})$$

Considerando a hipótese de que as duas grandezas (*corrente de falta I e comprimento D da linha*) sejam independentes entre si, a densidade de probabilidade conjunta relativa a um determinado valor de corrente de defeito na linha (pré-fixado um valor de corrente de falta I na barra) tem-se:

$$f(I, D) = f_I(I) f_D(D) \quad (\text{VIII-25})$$

sendo:

$f_I(I)$ - função densidade de probabilidade de correntes de defeitos nas barras;

$f_D(D)$ - função densidade de probabilidade de comprimentos das linhas.

Nestas condições a probabilidade de ter-se uma corrente de defeito na linha, tal que a condição $J > i$ se verifique, para um valor de corrente fixado I na barra e para qualquer valor de comprimento D da linha ligada à barra, resulta:

$$P\{J > i / I\} = \int_{D=0}^{d_0} f_D(D) dD + \int_{d_0}^{\infty} \frac{d_0}{D} f_D(D) dD \quad (\text{VIII-26})$$

A corrente de falta I na barra pode assumir, teoricamente, valores compreendidos entre i e ∞ . Portanto a probabilidade resultante é a integral da probabilidade relativa a cada valor de corrente de defeito na barra, isto é:



$$P\{J > i\} = \int_{I=i}^{\infty} \left[\int_{D=0}^{d_0} f_D(D) dD + \int_{d_0}^{\infty} \frac{d_0}{D} f_D(D) dD \right] f_I(I) dI \quad (\text{VIII-27})$$

Assim a probabilidade de que a corrente de falta ao longo da linha possa assumir um valor J maior que um valor dado i , pode ser obtida através da equação a seguir:

$$P\{J > i\} = 1 - F_J(i) = \int_{I=i}^{\infty} \left[F_D(d_0) + d_0 \int_{d_0}^{\infty} \frac{f_D(D)}{D} dD \right] f_I(I) dI \quad (\text{VIII-28})$$

sendo:

$F_J(i)$ - função de repartição da variável casual J .

Empregando os procedimentos, Distribuição de Correntes de Curto-Circuito nas Barras e Distribuição de Comprimentos de Linhas, obtém-se as distribuições $f_I(I)$ e $f_D(D)$, respectivamente.

A partir das distribuições de frequências $f_I(I)$ e $f_D(D)$ determina-se a função $F_J(i)$ fazendo-se i assumir valores compreendidos entre aqueles mais extremos das classes de corrente. Uma vez fixado i , decorrem deste valor, todos os demais empregados na obtenção da função de repartição. Com este propósito, apresenta-se para a relação (VIII-28) a sua correspondente forma discreta, dada pela expressão (VIII-29):

$$P\{J > i\} = 1 - F_J(i) = \sum_{I_k > i} \left[\sum_{D_k \leq d_0} f_D(D_k) \Delta D_k + d_0 \sum_{D_k > d_0} \frac{f_D(D_k)}{D} \Delta D_k \right] f_I(I) \Delta I_k \quad (\text{VIII-29})$$

sendo:

k - intervalo para o qual as desigualdades se verificam, ficando definido a partir de valor assumido por i .

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15378-000 ILHA SOLTEIRA - SP

