### HAMILTON GUILHERME BUENO DE SOUZA

ANÁLISE DAS CORRENTES TRANSITÓRIAS DE INRUSH EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

São Paulo

### HAMILTON GUILHERME BUENO DE SOUZA

ANÁLISE DAS CORRENTES TRANSITÓRIAS DE INRUSH EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração:

Engenharia Elétrica

**Orientador:** 

Prof. Dr. Carlos César Barioni de Oliveira

**Co-orientador:** 

Prof. Dr. Alden Uehara Antunes

São Paulo

2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.
São Paulo, 29 de junho de 2007.
Assinatura do autor
Assinatura do orientador

## FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Hamilton Guilherme Bueno de Análise das correntes transitórias de *inrush* em redes de distribuição / H.G.B. de Souza. -- São Paulo, 2007. 107 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Redes de distribuição de energia elétrica 2.Eletrodinâmica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

# À José Paulo e Hilda (em memória),

Meus queridos pais, pelo amor e incentivo em todos os momentos e conquistas da minha vida.

# À Vivian,

Um anjo em minha vida, que sempre me ensina a sonhar e acreditar, dando-me alegria permanente de viver.

#### **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Carlos César Barioni de Oliveira, meu mestre e orientador, pelo incentivo e dedicação no desenvolvimento desta dissertação e ao longo de todo o curso.

Ao Prof. Dr. Alden Uehara Antunes, meu grande orientador, pela enorme paciência e dedicação, em todos os meses de convívio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng Nilson Baroni, Gerente do setor Distribuição Técnica da Regional ABC da AES-Eletropaulo, pelo incentivo em sempre buscar o autodesenvolvimento e me dar sempre oportunidades de aprendizagem, além de seu exemplo profissional.

Ao Eng<sup>o</sup> Aparecido Domingues, Coordenador da área de Desempenho do Sistema Elétrico da Regional ABC da AES-Eletropaulo, pela paciência e nas disponibilizações de horários sempre quando eu precisei para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da Eletropaulo – com quem convivo e aprendo todos os dias, em especial, aos queridos amigos Cláudio Takahiro Nakamura Mineta e Antônio Monteiro, os meus grandes amigos os quais sempre me ajudam nas horas de desafios profissionais.

À Stela, minha querida e amável filha que desde quando passou a existir, sempre me deu sentido e alegria permanente em viver.

Aos meus irmãos que sempre me incentivaram em estudar e encarar desafios que me engrandece. Em especial á Priscila, a qual me incentivou nas horas mais difíceis durante este trabalho.

À Peracilda Mascarenhas, atual esposa de meu pai, pelo incentivo e contribuição de minha vida, especialmente a formação intelectual, onde foi fundamental em adquirir mais esta conquista.

À Deus por tudo e todos em minha vida, sem exceção.

# **SUMÁRIO**

### LISTA DE FIGURAS

# LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
2.1. Introdução	19
2.2. Sistema Coordenado	23
2.3. Sistema Seletivo	25
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1. Considerações Gerais	27
3.2. Metodologias para avaliação da Corrente de Inrush	27
3.3. Técnicas para Minimização da Corrente de Inrush em Chaveamentos	35
3.4. Metodologias para Distinguir e Detectar Correntes de Inrush	38
3.5. Problemas causados pelas Correntes de Inrush	43
3.6. Cargas frias em Redes de Distribuição	46
3.7. Conclusão	49
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CARGA	_
4.1. Considerações Gerais	51
4.2. Metodologia Adotada	52
4.3. Determinação das correntes de inrush em Carga quente	55
4.3.1. Apresentação dos Resultados das Correntes de Inrush em Cargas Quentes	57
4.3.1.1. Subestação Anchieta (ANC)	57

4.3.1.2. Subestação Taboão da Serra (TSE)	58
4.3.1.3. Subestação Embu (EMB)	59
4.3.1.4. Subestação Mandaqui (MAD)	60
4.3.1.5. Subestação Monções (MOC)	61
4.3.1.6. Subestação Piraporinha (PIP)	
4.3.1.7. Subestação Parelheiros (PRE)	62
4.3.1.8. Subestação Rio Grande (RGR)	63
4.3.1.9. Subestação Lubeca (LUB)	
4.3.1.10. Subestação Itaquera (ITR)	64
4.3.1.11. Subestação Jordanésia (JOR)	
4.3.1.12. Subestação Comandante Taylor (CTA)	65
4.3.1.13. Subestação Diadema (DIA)	
4.3.1.14. Subestação Campestre (CPE)	66
4.3.1.15. Subestação Carrão (CRA)	
4.3.1.16. Subestação Butantã (BUT)	
4.3.1.1.7. Subestação Clementino(CLE)	
4.3.1.18. Subestação Buenos Aires (BAI)	
4.3.1.19. Subestação Bartira (BAR)	
4.3.1.20. Subestação Barra Funda (BFU)	71
4.3.2.2. Fator Multip. k ajustado para o instante 16,6ms através de Intervalos a	75
4.3.2.4. Fator Multiplicativo k Ajustado para o Instante 100 ms (6 ciclos)	
4.3.2.5. Fator Multip. k Ajustado para o Instante 100 ms Através de Intervalos a	
	79
4.3.2.6. Fator Multiplicativo (K100 ms) ajustado em Função da Potência Instalada	
4.3.2.6. Fator Multiplicativo (K100 ms) ajustado em Função da Potência Instalada  CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR	
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR	RGA FRIA 82
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR	RGA FRIA 82
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR	RGA FRIA 82
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR 5.1. Considerações Gerais	RGA FRIA 82 82
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR  5.1. Considerações Gerais	8GA FRIA 82 82 82
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR  5.1. Considerações Gerais  5.2. Determinação das correntes de inrush em Carga fria  5.2.1. Apresentação dos Resultados das Correntes de Inrush em Cargas Frias	8GA FRIA 82 82 82 84
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR  5.1. Considerações Gerais	82 82 84 84 85
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CAR  5.1. Considerações Gerais  5.2. Determinação das correntes de inrush em Carga fria  5.2.1. Apresentação dos Resultados das Correntes de Inrush em Cargas Frias  5.2.1.1. Subestação Bartira (BAR)	8GA FRIA8282848485

5.2.1.6. Subestação Embu (EMB)	87
5.2.1.7. Subestação Itaquera (ITR)	87
5.2.1.8. Subestação Jordanésia (JOR)	87
5.2.1.9. Subestação Lubeca (LUB)	88
5.2.1.10. Subestação Monções (MOC)	88
5.2111. Subestação Piraporinha (PIP)	89
5.2.1.12. Subestação Parelheiros (PRE)	89
5.2.1.13. Subestação Rio Grande (RGR)	90
5.2.1.14. Subestação Taboão da Serra (TSE)	90
5.2.2. Análise dos Resultados	91
5.2.2.1. Fator Multip. k Ajustado para o Instante 16,6 ms (1 ciclo)	92
5.2.2.2. Fator Multip. k ajustado para o Inst. 16,6ms através de Intervalos de Confiança .	93
5.2.2.3. Fator Multip. (k 16.6ms) ajustado em Função da Potência Instalada	93
5.2.2.4. Fator Multip. k Ajustado para o Instante 100 ms (6 ciclos)	94
5.2.2.5. Fator Multip. k ajustado para o inst. 100ms através de Interv.de Confiança	96
5.2.2.6. Fator Multip. (k 100 ms) ajustado em Função da Potência Instalada	97
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH COM AS PO CURTO-CIRCUITO	
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS	105
7.1 Propostas para Novas Pesquisas	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Produção de corrente de inrush em um transformador
Figura 1.2 - Corrente de inrush referente a uma fase
Figura 2.1 - Fechamento de um banco de capacitor em uma fase
Figura 2.2 - Ajustes da proteção em função da corrente de inrush
Figura 2.3: Diagramar unifilar de um alimentador com a filosofia do sistema coordenado 23
Figura 2.4: Coordenograma típico do sistema coordenado
Figura 2.5: Diagrama unifilar de um alimentador com a filosofia do sistema seletivo
Figura 2.6: Coordenograma típico do sistema seletivo
Figura 3.1 - Corrente de inrush referente a uma fase
Figura 3.2 - Decomposição da corr. de inrush trif. utilizando a Transf. de Wavelet
Figura 3.3 - Característica da corrente de inrush após amostragem do sinal obtida por meio da aplicação da Transformada de Wavelet
Figura 3.4 - Sinal transitório característico da corrente de inrush
Figura 3.5 - Conteúdo harmônico da corrente de inrush obtido por meio de processo matricial e iterativo
Figura 3.6 - Representação da evolução do processo iterativo no domínio do tempo
Figura 3.7 - Efeito do fator de espaço na corr. de pico e na corr. de 2ª harm. do primeiro ciclo
Figura 3.8: Identificação da corrente de inrush a partir do relé de sequência zero através do algorítmo
Figura 4.1: Amostra de uma oscilografia de uma corrente de inrush de um alimentador primário
Figura 4.2 - Área de uma curva sendo calcula pelo Método dos Trapézios
Figura 4.3 - Estimativa do fator multiplicativo k referente ao instante 16,66 ms
Figura 4.4: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-16,6ms (carga quente) em função de freqüências ocorridas
Figura 4.5: Curvas sobrepostas de Distribuição Normal e Distribuição não normal

Figura 4.6: Curva e parâmetros da Distribuição Normal aproximada aplicada às amostras de corrente de carga quente em 16,6 ms
Figura 4.7 - Análise do fator multiplicativo k referente ao instante 100 ms (6 ciclos)
Figura 4.8: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-16,6ms (carga quente) em função de freqüências ocorridas
Figura 5.1 - Estimativa do fator multiplicativo k referente ao instante 16,66 ms
Figura 5.2: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-16,6ms (carga fria) em função de frequências ocorridas
Figura 5.3 - Análise do fator multiplicativo k referente ao instante 100 ms (6 ciclos)
Figura 5.4: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-100ms (carga fria) em função de frequências ocorridas
Figura 6.1 - Relação das potências de curto-circuito (Qcc 3F) das Subestações

# LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Resultados obtidos da SE Anchieta	57
Tabela 4.2 - Resultados obtidos da SE Taboão da Serra	59
Tabela 4.3 - Resultados obtidos da SE Embu	59
Tabela 4.4 - Resultados obtidos da SE Mandaqui	60
Tabela 4.5 - Resultados obtidos da SE Monções	61
Tabela 4.6 - Resultados obtidos da SE Piraporinha	61
Tabela 4.7 - Resultados obtidos da SE Parelheiros	62
Tabela 4.8 - Resultados obtidos da SE Rio Grande	63
Tabela 4.9 - Resultados obtidos da SE Lubeca	63
Tabela 4.10 - Resultados obtidos da SE Itaquera	64
Tabela 4.11 - Resultados obtidos da SE Jordanésia	65
Tabela 4.12 - Resultados obtidos da SE Comandante Taylor	65
Tabela 4.13 - Resultados obtidos da SE Diadema	66
Tabela 4.14 - Resultados obtidos da SE Campestre	66
Tabela 4.15 - Resultados obtidos da SE Carrão	67
Tabela 4.16 - Resultados obtidos da SE Butantã	68
Tabela 4.17 - Resultados obtidos da SE Clementino	68
Tabela 4.18 - Resultados obtidos da SE Buenos Aires	69
Tabela 4.19 - Resultados obtidos da SE Bartira	69
Tabela 4.20 - Resultados obtidos da SE Barra Funda	71
Tabela 4.21 - Fator multiplicativo k (16,66 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores	. 76
Tabela 4.22 - Fator multiplicativo k (100 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores	. 79
Tabela 4.23 - Valores sugeridos para os fatores multiplicativos da corrente nominal visando à determinação das correntes de inrush em carga quente	80

Tabela 5.1 - Resultados obtidos da SE Bartira	. 83
Tabela 5.2 - Resultados obtidos da SE Barra Funda	84
Tabela 5.3 - Resultados obtidos da SE Campestre	. 84
Tabela 5.4 - Resultados obtidos da SE Carrão	85
Tabela 5.5 - Resultados obtidos da SE Diadema	85
Tabela 5.6 - Resultados obtidos da SE Embu	86
Tabela 5.7 - Resultados obtidos da SE Itaquera	. 86
Tabela 5.8 - Resultados obtidos da SE Jordanésia	86
Tabela 5.9 - Resultados obtidos da SE Lubeca	87
Tabela 5.10 - Resultados obtidos da SE Monções	87
Tabela 5.11 - Resultados obtidos da SE Piraporinha	88
Tabela 5.12 - Resultados obtidos da SE Parelheiros	88
Tabela 5.13 - Resultados obtidos da SE Rio Grande	89
Tabela 5.14 - Resultados obtidos da SE Taboão da Serra	. 89
Tabela 5.15 - Fator multiplicativo k (16,66 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores	93
Tabela 5.16 - Fator multiplicativo k (100 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores	95
Tabela 5.17 - Valores sugeridos para os fatores multiplicativos da corrente nominal visando à determinação das correntes de inrush em carga fria	96
Tabela 6.1 - Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instan 16,66 ms para as correntes de inrush em carga quente	
Tabela 6.2 - Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instan 100 ms para as correntes de inrush em carga quente	
Tabela 6.3 - Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instan 16,66 ms para as correntes de inrush em carga fria	
Tabela 6.4 - Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instan 100 ms para as correntes de inrush em carga fria	

#### **RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo analisar as correntes de inrush que surgem nos momentos de energização dos alimentadores de sistemas de distribuição. Desta forma, são relevantes em projetos cotidianos de concessionárias de energia elétrica como por exemplo, nos cálculos de ajustes dos dispositivos de proteção.

Foram estudadas 291 (duzentas e noventa e uma) amostras extraídas de oscilografias de medidores alocados nas saídas de alimentadores de distribuição, os quais armazenaram informações de tais correntes nos momentos em que houveram religamentos bem sucedidos (carga quente), bem como em energizações após longos períodos de interrupção (carga fria). Todos os alimentadores analisados pertencem a AES-ELETROPAULO.

Os valores (em magnitude) das correntes de inrush foram analisados nos primeiros instantes (16,66 ms e 100 ms) logo após o momento da energização dos alimentadores, sendo os valores estudados como variáveis probabilísticas.

As análises desta dissertação fundamentaram-se na comparação dos dados oriundos de medição com os resultados de cálculo segundo o modelo tradicional (aplicação de fatores multiplicativos), na qual se observa uma clara majoração que tende a sobredimensionar os resultados das correntes. Desta forma este trabalho sugere a adoção de valores (ou faixa de valores) mais adequados e que tendem a garantir uma aproximação mais consistente com as medições.

Comparando os valores (magnitude) dos fatores multiplicativos para as correntes de inrush entre carga quente e carga fria, verifica-se que as correntes de inrush em carga fria tendem a ser maiores do que em carga quente. Bem como em ambas as cargas, observa-se a relação direta de proporcionalidade do fator multiplicativo com a potência instalada dos alimentadores em termos dos transformadores de distribuição.

#### **ABSTRACT**

The purpose of this dissertation is to analyze the inrush currents generated upon the energization of distribution system feeders. These said currents are relevant for typical designs in electric power concessionaries, for example upon calculating the ideal settings for protection devices.

It was analyzed (or studies) 291 (two hundred and ninety one) oscilography samples extracted from measuring devices oscilographs were analyzed. These devices were placed in the beggining of distribution feeders, and stored information on such currents both in successful reclosing (hot load) events and re-energization after long periods of outage (cold load) events. All feeders analyzed belong to the AES-Eletropaulo.

The inrush current values (in magnitude) were analyzed right after (more specifically 16.66 ms and 100 ms) the feeder energization. For this reason, its corresponding values were studied as a probabilistic variables.

This analysis was based on the comparison between measured data and traditional model (application of factor coefficients) calculation results, in this way, observed it that the traditional model yields over-dimensioned results which lead to oversizement of the results currents. It has thus suggested revised, more suitable values (or bands of values) which are bound to ensure a more consistent approximation to the real measurements.

Upon comparing the final value (in magnitude) results on the analysis of the factor coeficients for inrush currents for hot load and cold load, it is observed that the cold load inrush currents tend to be higher than those for hot load. Furthermore, it was observed the direct relation of proporcionality of the factor coeficients to the ratings capacity transformer power installed along the feeder lines.

# **CAPÍTULO 1**

# INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de estudo para a determinação dos valores máximos (em magnitude) das Correntes de Inrush dos alimentadores de distribuição em média tensão. Salienta-se também que este método é discutido e comparado com os métodos tradicionais os quais são utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia, os quais se baseiam em fatores multiplicativos das correntes nominais dos alimentadores. Este trabalho fundamentou-se em análises de campo, pois em sua totalidade, utilizou-se informações extraídas de ocorrências reais do sistema elétrico da AES-Eletropaulo.

De forma geral, a corrente de inrush de um alimentador pode ser considerada como a somatória de todas as correntes transitórias geradas em cada transformador atendido [1]. Para cada transformador, a corrente de magnetização correspondente constitui-se num fenômeno transitório para acomodação do campo magnético do núcleo, da condição estável "antes", para a condição estável "depois". Surgem altas correntes de magnetização no momento da energização, com intensidades diferentes nas três fases.

Devem ser contemplados para o fenômeno do "inrush", os seguintes aspectos:

- O aparecimento da componente de corrente contínua (cc) devido aos chaveamentos das fases;
- A existência de fluxo remanescente no núcleo do transformador.

Se a fase for fechada quando teoricamente a corrente está 'passando' por zero, não há transitório para esta fase, sendo que a forma de onda da corrente de magnetização segue seu curso normal. Se, entretanto, o fechamento da fase estiver fora deste instante, ocorrerá deslocamento da corrente no eixo vertical para acomodar a situação. Isto é, aparece uma **componente de corrente contínua**, e o deslocamento do eixo da corrente pode levar à saturação do núcleo.

Adicionalmente, se um transformador pudesse ser energizado no instante em que o valor da onda de tensão correspondesse ao fluxo magnético real do núcleo nesse instante, a energização seria

uma suave continuação da operação anterior, sem que ocorresse um transiente magnético. Mas na prática, o instante do chaveamento não está sob controle e assim um transiente magnético é praticamente inevitável.

Quando um transformador é desenergizado, a corrente de magnetização segue o laço de histerese até o zero, e a densidade de fluxo segue para um valor residual Br (conforme a **figura 1.1**). A **figura 1.1** [2] mostra a forma de onda da corrente de magnetização II e da densidade de fluxo BI definitivamente interrompida no instante marcado pela primeira linha vertical traçada, na qual a corrente passou pelo zero, com o fluxo em um valor residual Br. Se o transformador não fosse desenergizado, as ondas de corrente e de densidade de fluxo teriam seguido as curvas tracejadas, mas com o transformador sendo desenergizado, elas seguem as linhas sólidas horizontais I2 e B2, a corrente em zero e a densidade de fluxo em +Br.

Para ilustrar o fenômeno do 'inrush' sob condições que o levarão ao transiente máximo, assumiremos que o circuito é restabelecido no instante indicado pela segunda linha tracejada vertical quando a densidade de fluxo estaria normalmente em seu máximo valor negativo (-*Bmax*). Desde que o fluxo magnético não pode ser criado ou destruído instantaneamente, a onda de fluxo ao invés de partir com seu valor normal (-*Bmax* no caso presente) e crescer seguindo a curva tracejada, parte do final de *B2*, com valor residual +*Br* e traça a curva *B3*.

A curva *B3* é uma curva senoidal deslocada ao invés da característica de saturação do circuito, porque com uma tensão senoidal aplicada, a força contra-eletromotriz e, portanto, a onda de fluxo de fluxo tem de ser senoidais. A saturação modifica não o fluxo, mas apenas a corrente de magnetização necessária para produzi o fluxo.

A onda de corrente, correspondente à onda de densidade de fluxo B3, é mostrada como I3. O valor teórico máximo da curva B3 é Br + 2Bmax, e se o transformador for desenhado para uma densidade de fluxo econômico Bmax, a crista de B3 produzirá super saturação no circuito magnético e produzirá uma crista muito grande na corrente de magnetização. Deve-se lembrar que a onda de densidade de fluxo controla a corrente e não a corrente controla a densidade de fluxo.

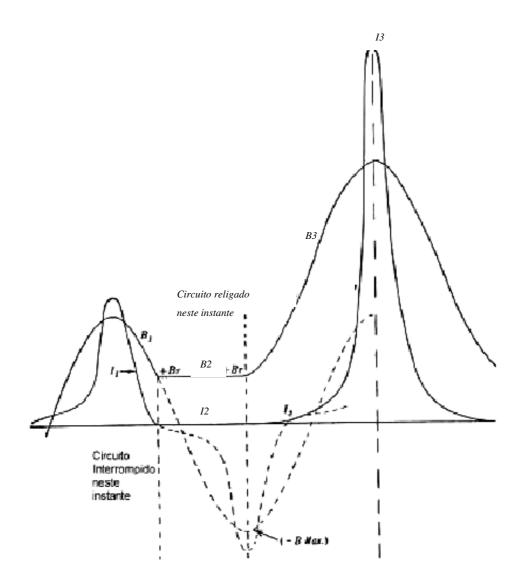


Figura 1.1: Produção de corrente de inrush em um transformador

A **figura 1.2** ilustra melhor visualização da forma de onda resultante da corrente de inrush conforme descrita nos parágrafos anteriores:



Figura 1.2: Corrente de inrush referente a uma fase

O pico é atingido em ½ (meio) ciclo após a energização, sendo que a corrente é normalizada em até 6 (seis) ciclos [1].

Este item na maioria das vezes é muito considerado na tomada de decisões nos estudos e análises para dimensionamentos e ajustes dos dispositivos de proteção que integram os alimentadores primários. Isto porque sempre que as concessionárias investem em manutenção e instalação de dispositivos de proteção no sistema elétrico, é exigido que tais equipamentos operem corretamente de modo a minimizar ao máximo possível, desligamentos indesejáveis ou não necessários aos consumidores.

Pode-se considerar em relação aos equipamentos de proteção (relés, religadores automáticos, seccionalizadores e fusíveis) que o grande desafio além de se determinarem marcas, modelos, funções, locais de instalação, e outros requisitos, é também parametrizá-los de tal forma a otimizar ao máximo possível a identificação de defeitos nos sistemas e diferenciá-los de pequenos distúrbios transitórios como por exemplo, as correntes de inrush, para assim tomar-se a decisão em desligar e isolar os trechos ou redes em defeitos [3].

Ao longo dos anos, observa-se que esses equipamentos evoluíram bastante em relação às funções de proteção, confiabilidade, automação, compatibilidade de suas dimensões, e outros itens referentes aos equipamentos em si, porém, nos sistemas elétricos protegidos por estes, no tocante às magnitudes das correntes de inrush, poucos tópicos foram descobertos ou evoluídos durante os últimos anos, sendo que os fabricantes concentraram suas pesquisas na composição dessas correntes, como por exemplo, ordem de harmônicas. Desta forma visando diferenciar as correntes de defeitos das correntes de inrush.

Por consequência disto, determinadas funções de proteção (função instantânea de fase e de neutro – 50/50N; função temporizada de fase e neutro 51/51N) ainda são ajustadas de acordo com o método tradicional de estimativa das correntes de inrush, o qual resulta na majoração dos ajustes dessas referidas funções de proteção.

A metodologia básica deste trabalho consiste na extração do maior número possível de amostras de medições deste fenômeno nos disjuntores dos alimentadores primários, e para cada evento, essas

grandezas são analisadas como variáveis aleatórias, determinando-se seus respectivos valores máximos (em magnitude) e, dentro de um grau de confiabilidade (aceitável de dispersão e desvio padrão) obtendo-se assim fatores multiplicativos ajustados. Desta forma, pode-se estimar os valores que as correntes de inrush realmente alcançam, de acordo com o perfil da carga instalada do alimentador [4].

Todas as redes bem como as ocorrências analisadas neste trabalho foram extraídas da concessionária de energia elétrica AES Eletropaulo, onde em cada um dos alimentadores analisados, respectivamente há um medidor da marca Power Meansurement modelo 3720, dos quais foram utilizadas informações pertinentes às medições, cargas e oscilografias.

# **CAPÍTULO 2**

# CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

## 2.1 Introdução

Neste capítulo são abordados os principais problemas e dificuldades que as correntes de Inrush impõem aos sistemas distribuidores de energia. Isto se deve ao grau de incertezas que existem em alguns parâmetros tais como, valores freqüentemente alcançados (em magnitude), tempo de duração, comportamentos e impactos nos dispositivos de proteção.

Analisando o histórico dos últimos anos, percebe-se uma grande evolução dos equipamentos de proteção, ou seja, há 20 (vinte) anos atrás, percebia-se a chegada dos relés eletrônicos ou estáticos, os quais estavam comprometidos à substituir os eletromecânicos. Porém, em um curto prazo de tempo, notou-se que estes relés ofereciam poucas vantagens em relação aos eletromecânicos, uma vez que em ambos, os recursos para ajustes e funções de proteção eram iguais, sendo que os eletrônicos apresentavam menor vida útil e riscos de interferências eletromagnéticas, pois os seus respectivos locais de instalação situavam-se dentro das subestações (alto nível de campo eletromagnético oriundo dos transformadores de potência).

Já nos últimos 15 (quinze) anos, com a chegada dos relés de tecnologia digital ou microprocessada, os quais oferecem maiores recursos no que diz respeito às funções de proteção, ajustes e oscilografias, estes apresentam também maior 'vida útil' e pouca vulnerabilidade às interferências eletromagnéticas. Desta forma, no tocante à proteção para alimentadores primários, resultou na substituição gradativa para estes tipos de relés, uma vez que nos relés eletromecânicos, eram apenas permitidos ajustes em parâmetros básicos como por exemplo, correntes mínimas de disparo (Tap) e alavancas de tempo (curvas de atuação).

Porém, percebe-se que as metodologias de cálculos permaneceram as mesmas, onde consideram altos valores (em magnitude) para as correntes de inrush. Nos próximos parágrafos são

apresentadas algumas considerações referentes à este tópico, bem como seus impactos nos alimentadores de distribuição de energia elétrica.

Conforme citado no capítulo anterior, atualmente ainda há uma grande dúvida referente aos valores alcançados (em magnitude) pelas correntes de inrush. Pode-se afirmar que são encontradas grandes dificuldades ao se tentar estimá-las para um único transformador, desta forma, ao se estimar essas mesmas correntes na saída de um alimentador de distribuição, as dificuldades se potencializam, devido a presença de diversos transformadores e, em até certos casos, bancos de capacitores os quais também geram este fenômeno.

A estimativa do valor da corrente de inrush para um alimentador primário de distribuição, em qualquer situação depende de muitas variáveis. À seguir estão descritas algumas dessas incógnitas [5]:

- a) Tempo do instante do chaveamento na senoide da tensão da fonte;
- **b**) Extensão e bitola dos condutores que alimentam o(s) transformador(es);
- c) Potência de curto circuito nos respectivos pontos de inserção dos transformadores;
- **d)** Tamanho de cada transformador:
- e) Tipo individual de cada transformador (líquido, seco, 80C, etc);
- f) Magnetismo residual no instante do desligamento
- g) Interação simpática entre os transformadores [6]
- h) Presença de bancos de capacitores.

Conclui-se então que não há uma equação simples ou padrão que possa ser usada para prever as correntes de inrush em termos genéricos, e com isso, devido a grande incerteza gerada, a maioria das concessionárias no país, utilizam fatores multiplicativos elevados em relação a corrente nominal da potência instalada nos alimentadores.

Os bancos de capacitores que geralmente se alocam ao longo dos alimentadores e em cabines primárias (consumidores industriais) também são equipamentos os quais nos momentos de chaveamentos, provocam transitórios e por consequência correntes de inrush. O circuito simplificado de um alimentador (circuito RLC) da **figura 2.1** [1], ilustra este fenômeno:

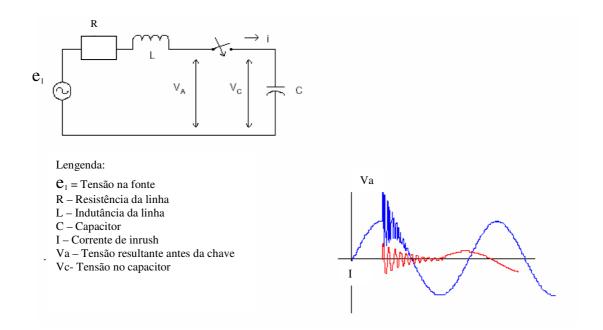


Figura 2.1: Fechamento de um banco de capacitor em uma fase

Durante os chaveamentos ou energizações de bancos de capacitores, as correntes de inrush (I) geradas por bancos de capacitores tem tempo de duração menor do que as geradas pelos transformadores, porém os transitórios oriundos da tensão nestes instantes (Vc) da **figura 2.1** são de altas freqüências (na faixa de 200 a 1000 Hz) [1]. As sobretensões causadas por estes transitórios não preocupa muito as concessionárias uma vez que a magnitude desses os surtos de tensão se situam, geralmente, abaixo do nível de coordenação da isolação da rede elétrica.

Determinadas faixas de freqüências desses transitórios, permitem que estes últimos 'passem' através dos transformadores abaixadores para as cargas dos consumidores, onde desta forma, surgem sobretensões no lado do secundário destes transformadores podendo causar problemas ou danos nas instalações elétricas ajusantes à estes equipamentos.

Em um alimentador, existe ainda a possibilidade da energização de um banco de capacitores com um outro banco já em operação, o qual é conhecido como chaveamento "back to back" [1]. Correntes de alta intensidade podem estar associados a esse chaveamento devido à corrente de inrush.

Tendo em vista as diversas variáveis e consequentemente incertezas para a determinação teórica das correntes de inrush ilustradas até o momento, os resultados dos cálculos resultam em correntes com valores altos, onde em alguns casos chegam em dezenas de milhares de Ampéres. Desta forma, influenciam as filosofias adotadas para seletividade dos equipamentos de proteção, pois nestes últimos, resultam na elevação ou ajuste do nível da corrente mínima de disparo (taps) com o intuito de não atuar para as correntes de inrush.

Nos relés de proteção de sobrecorrentes dos alimentadores, as funções mais influenciadas são as instantâneas de fase e de neutro (50 / 50N), as quais podem prejudicar no desempenho dos indicadores técnicos do sistema elétrico, pois quando se aumenta o valor de disparo da função instantânea, em alguns casos o relé apresenta coordenação apropriada com os elos fusíveis para defeitos transitórios, onde assim, o mesmo não é sensibilizado pelos defeitos (dependendo do nível de curto-circuito) [7].

Na **figura 2.2** é ilustrado um coordenograma dos dispositivos de proteção de um alimentador, onde se observa o 'recuo' da unidade instantânea devido ao alto valor previsto da corrente de inrush:

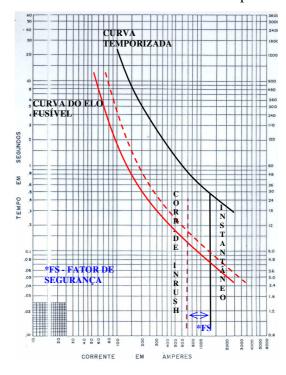


Figura 2.2: Ajustes da proteção em função da corrente de inrush

Desta forma, dependendo dos valores dos elos fusíveis e do nível de curto-circuito, deixa-se de ter um sistema coordenado [8] (resulta em um sistema de proteção no qual o relé da saída do alimentador opera de modo a proteger o elo fusível contra defeitos transitórios), e passa-se a ter um sistema seletivo [8] (resulta em um sistema de proteção no qual o relé da saída do alimentador permite que os elos fusíveis atuem primeiro independentemente se os defeitos são transitórios ou permanentes). Para os religadores automáticos essa teoria também é válida em alguns casos. Nos parágrafos seguintes, estão descritos as filosofias dos sistemas seletivos e coordenados de proteção citados neste parágrafo.

### 2.2 Sistema Coordenado

Conforme a referência [8], para os defeitos ocorridos após os elos fusíveis, dependendo do valor ajustado no dispositivo instantâneo do relé de sobrecorrente na subestação, este último pode ser sensibilizado, provocando o desligamento do circuito visando preservar a integridade do elo fusível. Podemos adotar a filosofia de coordenação em alimentadores cujo sua carga é predominantemente residencial, onde as interrupções de curta duração não causam desconforto aos consumidores.

Basicamente o funcionamento do sistema coordenado [3] é ilustrado na **figura 2.3**, onde se pode observar a coordenação dos relés da subestação com os equipamentos situados em pontos dentro da zona de proteção na qual o disjuntor é proteção de retaguarda [3].

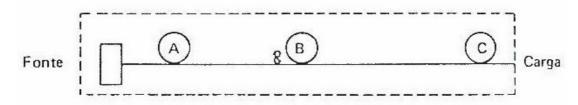


Figura 2.3: Diagramar unifilar de um alimentador com a filosofia do sistema coordenado

Desta forma, ocorrendo defeitos na zona BC, a unidade instantânea (50 ou 50N) fase ou neutro do relé na subestação operará desligando o disjuntor antes de fundir o elo fusível. Em seguida, o

disjuntor religará acionado pelo relé de religamento e será bloqueada a unidade instantânea do relé de sobrecorrente.

Caso o defeito tenha se extinguido, o fornecimento de energia estará restabelecido, entretanto, caso o defeito persistir, o relé de sobrecorrente irá operar através da unidade temporizada (51 ou 51N), fase ou neutro, que possui tempos de operação superiores aos tempos de fusão dos elos, realizando seletividade com o trecho BC, desta forma, o elo fusível irá interromper e isolar o trecho onde está localizado o defeito antes de um novo desligamento total do alimentador ocasionado pelo disjuntor. O coordenograma deste sistema é ilustrado na **figura 2.4**:

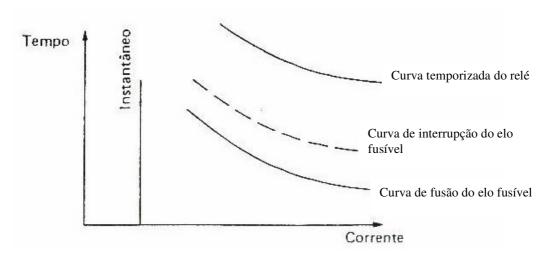


Figura 2.4: Coordenograma típico do sistema coordenado

Neste sistema, o ajuste dos elementos instantâneos de fase e de neutro nos relés de sobrecorrente são fixados em valores baixos, suficientes para suportar a corrente de magnetização do alimentador na ocasião de um religamento em carga fria.

Na maioria dos casos em que se instalam religadores ao longo dos alimentadores, os trechos além estes equipamentos, adotam-se esta filosofia (sistema coordenado). Nesses casos, a curva rápida do religador fará o papel do elemento instantâneo do relé, atuando antes do elo fusível durante o número de vezes que a curva rápida for ajustada. Quando o religador atingir a operação de curva lenta, a sua curva será concorrente com a curva do elo fusível, que irá interromper e isolar o trecho onde está localizado o defeito antes da atuação do religador, evitando o novo desligamento do trecho supervisionado por este equipamento.

### 2.3 Sistema Seletivo

Neste sistema, para qualquer defeito após um elo fusível, os elementos instantâneos não terão sensibilidade suficiente para detectar a falta e os elementos temporizados estarão seletivos com os elos fusíveis do circuito, que atuarão antes dos elementos temporizados [8]. Os elementos instantâneos terão sensibilidade somente para detectarem defeitos no tronco do alimentador, ou seja, suas respectivas zonas principais de proteção [3].

Conforme ilustrado na **figura 2.5**, a unidade temporizada cobre a zona para a qual o disjuntor é proteção de retaguarda (até o ponto C) e a unidade instantânea cobre somente a zona na qual o disjuntor é proteção primária (até o ponto B).

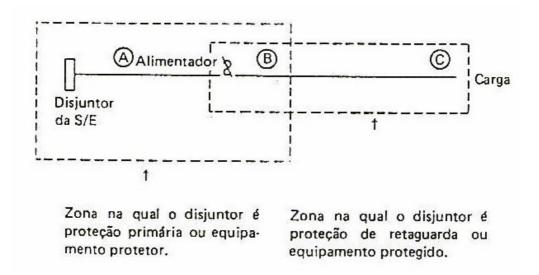


Figura 2.5: Diagrama unifilar de um alimentador com a filosofia do sistema seletivo

Para defeitos no trecho BC, o elo fusível deverá fundir antes de operar o relé da subestação. A **figura 2.6** ilustra o coordenograma deste sistema, onde se observa que o ajuste do elemento temporizado do relé da subestação é 'recuado', ou seja, apresenta valores altos de parametrização:

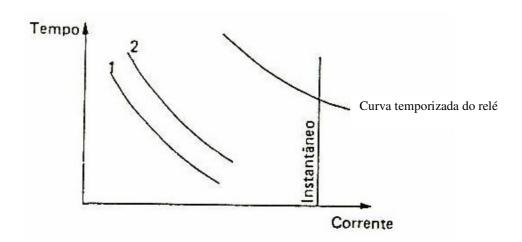


Figura 2.6: Coordenograma típico do sistema seletivo

Obs.: 1 – Curva mínima de fusão do elo fusível;

2 – Curva máxima de interrupção do elo fusível.

A filosofia de circuitos seletivos tem um bom desempenho onde as cargas atendidas são predominantemente industriais ou comerciais, nas quais as interrupções de qualquer natureza causam transtornos aos consumidores.

Tendo em vista as filosofias de proteção até aqui apresentadas, não há dúvida de que objetivo deste trabalho torna-se de fundamental importância para a otimização dos ajustes dos equipamentos de proteção em redes de distribuição.

# **CAPÍTULO 3**

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 3.1 Considerações Gerais

No segmento de distribuição de energia elétrica, no que diz respeito às correntes de inrush, observam-se na literatura especializada, vários trabalhos experimentais, os quais descrevem metodologias e análises para se estimar ou estudar seu comportamento. Nesta revisão bibliográfica são comentados alguns artigos os quais descrevem as principais metodologias para se estimar avaliações e comportamentos no tocante às correntes de inrush em alimentadores de distribuição, transformadores e outros equipamentos os quais produzem este fenômeno, bem como mostrar o seu respectivo estado da arte.

## 3.2 Metodologias para avaliação da Corrente de Inrush

Conforme citado anteriormente, diversos artigos buscaram descrever métodos para se estimar o comportamento e até mesmo cálculos para a determinação das correntes transitórias de inrush. Nos próximos itens estão descritos os principais trabalhos que se enquadram neste contexto, embora nenhum deles demonstre com detalhes ou precisão os reais valores alcançados (em magnitude) por essas correntes, no que diz respeito às energizações de alimentadores primários de distribuição de energia elétrica.

O fenômeno da corrente de inrush presente em energizações (religamentos) de transformadores, têm sido um problema nos projetos e desenvolvimentos de relés de proteção usados em sistemas de transmissão e distribuição de energia. O valor na condição estável (momento após valor de pico) da corrente de magnetização de um transformador pode ser somente 1% a 2% do valor da corrente previamente esperada, mas em alguns eventos chega a 10 a 20 vezes da corrente nominal do equipamento nos primeiros instantes logo após o chaveamento [9]. Este efeito transitório pode

persistir por muitos segundos antes da condição de estabilidade, e desta forma, ocasionar operações indevidas nos relés com funções de proteção diferencial.

Algumas investigações nesta área foram feitas por diversos pesquisadores utilizando métodos analíticos e derivados, com destaque para um trabalho realizado em 1944 por Blume [10], o qual estudou o referido problema com o objetivo de minimizar o valor do primeiro pico das correntes de magnetização de inrush.

Em 1951 [11], Specht desenvolveu expressões matemáticas para determinar o formato da corrente de inrush, sendo revistas posteriormente por Yacamini e Abu-Nasser, respectivamente, em 1981 e 1986 nas referências [12 e 13]. Atualmente, tais expressões são bastante úteis para pré-determinar especificações de quaisquer dispositivos de proteção, e também podem ser usadas para cálculos estimativos dos níveis das correntes de inrush, tendo em vista diminuir a sensibilidade de relés com função de proteção diferencial.

Em 1969, na referência [14] Spect afirmou que a condição de regime 'estável' da corrente de inrush de um transformador é aproximadamente 5% (cinco por cento) da corrente nominal de sua carga, e que seu transitório inicial (pico) pode alcançar até 10 (dez) vezes o valor desta corrente com um tempo de duração de até 0,5 segundo.

Com referência a estas informações, em 1986 Yacamini e Abu-Nasser [15] afirmaram que a tensão transitória que é induzida (valor de pico) por essas correntes de magnetização, no lado do secundário de um transformador, pode apresentar um tempo de duração longo o suficiente para danificar componentes de circuitos eletrônicos, especialmente dispositivos semicondutores. Neste trabalho também foi constatado que o valor de pico desta tensão pode alcançar até 70% (setenta por cento) do valor nominal, em transformadores que alimentam circuitos conversores de corrente contínua.

Visando avaliar o comportamento da corrente de inrush, um método importantíssimo é a Transformada de Wavelet (WT), que foi apresentada [16] em 1985 por Morlet. A utilização desta técnica não busca determinar, propriamente, o valor da corrente de inrush, mas consiste na

amostragem do sinal corresponde a cada corrente de fase dos alimentadores procurando caracterizá-los segundo a designação de representações de tempo-escala (número de ciclos).

A amostragem na WT é calcada na utilização de uma janela de escala inteiramente modulada que é deslocada ao longo do sinal e, para cada posição, é determinado o espectro correspondente. O processo é repetido diversas vezes com uma janela ligeiramente maior ou menor em cada ciclo. Ao final, resulta-se em uma coleção de representações tempo-escala do sinal.

Analisa-se um caso genérico de WT expressada segundo a expressão (3.1):

$$C(a,b) = \sum_{b} \sum_{a} f(a)^{-b/2} \psi(2^{-b} - n - a)$$
 (3.1)

Onde:

 $\psi(t)$ : Função Wavelet mãe, de característica finita e de decaimento rápido

a: Fator de escala

b: Fator de translação

C: Coeficiente da Transformada de Wavelet

Uma grande variedade de famílias de 'Wavelets' tem sido proposta na literatura especializada, sendo a escolha da função mãe determinante na análise do perfil tempo freqüência correspondente.

Em 2004, Sedighi e Haghifan realizaram um trabalho [17] no qual propôs um método para detecção da corrente de inrush em transformadores de distribuição baseado na Transformada de Wavelet. Desta forma, pode-se discriminar as correntes de inrush de outros transientes oriundos de chaveamentos como, por exemplo, chaveamento de cargas, capacitores e defeitos do tipo faseterra. Para tais simulações, foi utilizado o programa (EMTP – em português: Programa de Transiente Eletro-magnético) para analise dos referidos fenômenos em um alimentador classe 20kV.

A figura 3.1 ilustra uma amostra de uma corrente de inrush numa fase extraída das simulações.

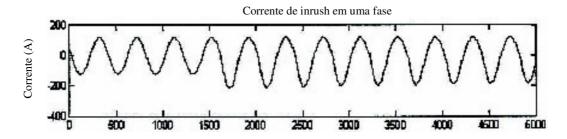


Figura 3.1: Corrente de inrush referente a uma fase

Em relação a este sinal, a **figura 3.2** mostra a decomposição correspondente utilizando-se a Transformada de Wavelet, onde se observa a utilização de 6 coeficientes por ciclo na decomposição do sinal (D1 à D6). A forma de onda denominada *a6* é a soma desses coeficientes, e *S* é a amostra original do sinal corrente.

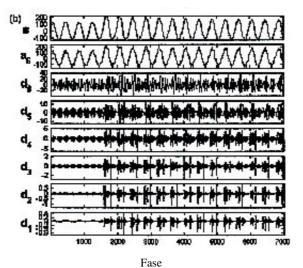


Figura 3.2: Decomposição da corrente de inrusn trifásica utilizando a Transformada de Wavelet

A **figura 3.3** ilustra a soma dos coeficientes obtidos através de um algoritmo para relés de proteção desenvolvido neste trabalho, utilizando a aplicação da Transformada de Wavelet em função do número de ciclos (nela se observa a característica de redução exponencial após três ciclos). Este processo foi repetido para todos os outros transientes onde se verificaram significantes diferenças em relação às correntes de inrush.

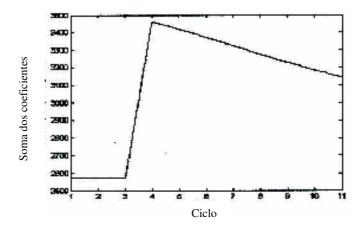


Figura 3.3: Característica da corrente de inrush após amostragem do sinal obtida por meio da aplicação da Transformada de Wavelet

Em 1987, J. Takehara [18] propôs um método teórico o qual analisa a corrente de inrush especificamente em transformadores trifásicos, através da modificação dos métodos de elementos finitos. Dessa maneira, a corrente de inrush é calculada de forma direta eletromagneticamente segundo a **expressão 3.2**, a qual foi obtida por resoluções das equações de Maxwell ao invés das equações de circuitos elétricos:

$$V = \frac{\partial}{\partial t} \int_{c^2}^{c_1} A.ds + L_0 \frac{\partial I}{\partial t} + (R_0 + R_c)I$$
 (3.2)

Onde:

V: Tensão de fornecimento do sistema elétrico

Lo e Ro: Indutância e Resistência do sistema elétrico

*Rc*: Resistência do enrolamento

c1 e c2: Contorno (m) ao longo do enrolamento

ds: Unidade do vetor tangente ao contorno c.

A: Vetor do potencial magnético

*I*: Corrente magnetizante

Portanto, neste método a corrente de inrush é estimada experimentalmente pelo uso de um sistema de medição do magnetismo residual, onde para ser obtido, deve ser conhecida a curva de histerese do núcleo do transformador.

Em 1999, Robert E. Furh publicou um estudo [5] com o objetivo de determinar critérios de ajustes em equipamentos de proteção em sistemas elétricos, os quais protegem transformadores à seco ou que trabalham em baixas temperaturas para reduzir operações indevidas dos relés devido as correntes de inrush evitando assim danos a equipamentos em um determinado sistema e que isole somente o circuito o qual apresenta defeito. Neste artigo, verificou-se que uma vez que esses tipos de transformadores geram correntes de inrush maiores do que outros tipos de padrão de construção, ocasionam problemas de coordenação dos elementos instantâneos dos equipamentos de proteção. Em relação aos critérios de ajustes dos equipamentos de proteção os quais protegem estes tipos de transformadores, o artigo recomenda que:

- 1. Sempre ajustar o elemento instantâneo do disjuntor do lado primário para o máximo, visando a relação dos transformadores de correntes (TC);
- 2. Na proteção temporizada do secundário ajustar em 125 % da corrente nominal, e utilizar a proteção temporizada do primário ajustada o quanto mais alto possível contanto que não exceda 250 % da corrente nominal;
- Ao utilizar disjuntores transistorizados, dar preferências para os que oferecem largos e múltiplos ajustes tanto para as funções de proteção temporizadas como para as instantâneas.

As correntes de inrush têm atenuação lenta e podem ser examinadas por representação de fasores no domínio da freqüência de harmônica como um fenômeno 'quase – estacionário'. Se baseando nisto, em 1989 Nikola Rajakovic e Adam Semleyem [19], utilizaram a análise neste domínio, incluindo componentes CC para se obter uma seqüência de imagens da condição de regime 'estável', na qual se constituiu em uma forma completa da corrente de inrush. Este trabalho mostrou como o fluxo remanescente do núcleo de um transformador no instante de chaveamento (energização) estabelece uma linha inicial inclinada, a qual determina a magnitude da corrente de inrush.

Os resultados deste trabalho evidenciaram que a prática de cálculo da corrente de inrush em transformadores trifásicos de qualquer tipo, construção e conexão é possível computacionalmente. Porém, nem sempre é necessário devido aos resultados dos cálculos para transformadores monofásicos serem conservativos e freqüentemente adotados.

Em 1994, Yacamini e Bronzeado [20] descreveram um método o qual através da análise do domínio do tempo combinam as equações elétricas e magnéticas internas de um transformador e as resolvem não como separadas, mas sim como um sistema simples. Desta forma foi calculada a corrente de inrush para um transformador monofásico de 5 kVA e um trifásico de 180 MVA. Desde então, para determinados fabricantes de transformadores, este método foi bastante útil para projetos de construção destes equipamentos, tendo em vista os diversos comportamentos dos fluxos magnéticos e suas saturações internas dos transformadores, os quais foram apresentadas durante os resultados deste trabalho.

Em 2001, J. Jesus Rico, Enrique Acha e Manuel Madrigal, publicaram um método matricial [21] de cálculo da corrente de inrush sugerindo o tratamento deste parâmetro (de natureza temporária) como integrante de uma sequência de transitórios, nos quais se busca uma modelagem por meio do conteúdo das harmônicas.

O transitório é equacionado por meio de um processo iterativo onde se utilizam <u>séries ortogonais</u> (podem-se utilizar as séries de Hartley; polinômios de Laguerre; polinômios de Chebyshev; Série de Fourie; Série de Walsh, entre outros). Estas séries convertem equações diferenciais (não lineares) em equações algébricas e a implementação computacional correspondente propicia um desempenho conveniente.

A aplicação deste método evidencia que à medida que se intera (o modelo proposto) o transitório associado a corrente de inrush é alterado (amortecido) até que um balanço harmônico é obtido (o que representa a "convergência do método").

A figura 3.4 ilustra idéia básica desta concepção onde um fenômeno transitório de duração 2l, e um conteúdo harmônico h têm um período Tss = 2l / h que corresponde à freqüência fundamental em regime permanente.

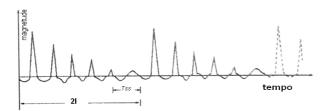


Figura 3.4: Sinal transitório característico da corrente de inrush

A **figura 3.5** ilustra a concepção do método, onde as equações diferenciais que regem o transitório da corrente de inrush são aproximadas e resolvidas no domínio da freqüência utilizando operação matricial. Devido a natureza não linear do problema, um processo iterativo é requerido na resolução. A **figura 3.6** mostra a representação do processo iterativo no domínio do tempo.

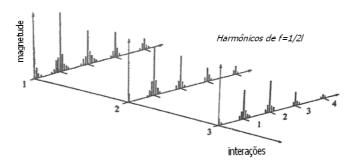


Figura 3.5: Conteúdo harmônico da corrente de inrush obtido por meio de processo matricial e iterativo

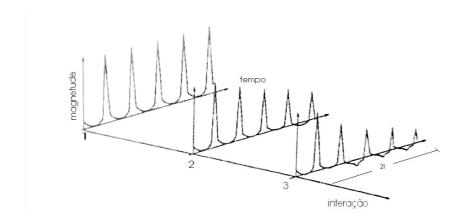


Figura 3.6: Representação da evolução do processo iterativo no domínio do tempo

A complexidade deste método e a correspondente dificuldade de aplicação relacionam-se a necessidade de estabelecimento à priori da equação não linear que caracteriza a corrente de inrush (dada como função do fluxo magnético no núcleo do transformador de distribuição).

## 3.3 Técnicas para Minimização da Corrente de Inrush em Chaveamentos

Muitos pesquisadores e companhias desenvolveram trabalhos com o objetivo de minimizar os altos valores das correntes de inrush, devido aos chaveamentos de manobras ou energização em diversos pontos dos sistemas elétricos de potência. Neste tópico estão descritas as principais metodologias que buscam o objetivo citado anteriormente.

Em 1983, Digneffe desenvolveu uma técnica [22] visando a diminuição da corrente de inrush, onde é proposto o controle elétrico dos chaveamentos de um transformador buscando o ponto ótimo da forma de onda da tensão de suprimento. Neste trabalho, foi descoberto que o chaveamento (fechamento) no instante de 90° (noventa Graus) da forma de onda da tensão em relação a corrente de inrush, reduz esta última, entretanto, o montante dessa redução pode não ser o bastante, dependendo da densidade de fluxo remanescente do núcleo do transformador. Além disso, essa aproximação é impraticável se existirem transformadores que apresentam parâmetros complexos de chaveamentos devido as suas construções e diminuição da vida útil.

Com o intuito de investigar as características da corrente de inrush em transformadores monofásicos, em 1988 Paul C. Y. Ling e Amitiva Basak desenvolveram um trabalho [23] que abordou um sistema de medição e controle, o qual é capaz de apresentar várias combinações de chaveamentos nos momentos de energizações, desta forma visando a diminuição das correntes transitórias de inrush.

Em 1993, Lin, Cheng, Huang e Yeh [24] através de uma técnica de simulação de energização de transformadores, trabalharam com medições de suas respectivas correntes de inrush, visando à obtenção de soluções precisas para o sistema elétrico em diversas condições de operações com variados tipos de cargas (cargas resistivas, indutivas, capacitivas e em vazio). Conseqüentemente,

utilizaram essa referida técnica para a análise de harmônicos (oriundos das correntes de inrush), onde os resultados estabeleceram metodologias para as suas respectivas minimizações, visando à qualidade do fornecimento de energia.

Procurando diminuir a corrente de inrush em linhas de distribuição, em 2002 Syed Jamil Asghar, concluiu uma pesquisa [25] a qual abordou três métodos para alcançar este objetivo. No primeiro método que é caracterizado por chaveamento controlado por tempo, Asghar afirmou que a variação da magnitude da corrente resultante depende do modo das conexões dos transformadores (estrela-estrela, estrela-delta, delta-delta e delta-estrela), e que o tempo total da operação do chaveamento deve estar entre um terço e um quarto de ciclo de duração. Para isso, uma chave estática (banco de tiristores) deve substituir o disjuntor objetivando controlar em um tempo preciso e rápido o chaveamento.

O segundo método é alocar bancos de capacitores no lado secundário dos transformadores ou tornar a carga altamente capacitiva, desta forma, no transformador o fluxo resultante da bobina secundária neutraliza o fluxo da bobina primária, onde conseqüentemente o nível de saturação do núcleo não é alcançado.

No terceiro método, Asghar propõe tornar a linha de distribuição como um filtro passa-baixa, alocando bancos de capacitores em uma determinada forma que elimine os harmônicos que compõem as correntes de inrush, resultando na supressão destas.

Atualmente foi proposto por W. Xu, Y. Cui e S.G. Abdusalam em 2005 [26 e 27], um esquema baseado na instalação de em resistor no neutro do transformador, com o objetivo de minimizar as correntes de inrush. Este resistor (com dimensões otimizadas) funciona junto com uma sequência de energização por fase em um transformador. O projeto de suas dimensões foi desenvolvido se referindo na análise da condição "estável" das correntes de inrush, onde foi concluído que quando o seu valor for aproximadamente 8,5% da reatância de magnetização não saturada, pode levar a redução de 80% a 90% das correntes de inrush. Entretanto, esse método não analisou o dimensionamento deste resistor em relação à perspectiva em chaveamentos do transformador em defeitos transitórios.

Com referência à esta metodologia, neste mesmo ano Sami G. Abdulsalam publicou um artigo [28] o qual apresentou melhorias nesta técnica, apresentando uma metodologia analítica para análise de transformadores durante a seqüência de energização por fase, levando em conta a impedância do sistema, o valor de um resistor alocado no neutro (*Rn*) de um transformador, bem como o seu fluxo residual. Esta metodologia foi baseada na análise de transitórios em circuitos não lineares e também em modelos de transformador não linear usando dois circuitos lineares resultando em um conjunto de equações analíticas para a forma de onda da corrente de inrush.

Desta forma, foi desenvolvida a **expressão 3.3** para a corrente de inrush máxima do chaveamento da primeira fase, a qual é em função do valor do resistor de neutro. Abaixo segue a respectiva simplificação:

$$I_{peak}(R_n) = A_2 e^{-(t_{peak} - t_s)/\tau^2} + B_2$$
 (3.3)

Onde:

I peak: Pico da corrente de inrush

 $R_n$ : Valor do resistor de neutro

A2: Variável em função da intensidade do campo conforme referência [28]

B2: Intensidade do campo magnético conforme referência [28]

*t peak*: Instante do pico da corrente de inrush

ts: Tempo de saturação do núcleo

72: Variável em função das indutâncias e resistências internas do transformador

conforme referência [28]

Os resultados de simulações experimentais deste trabalho revelaram que a magnitude máxima desta corrente é sempre mais alta do que as correntes dos chaveamentos da segunda e terceira fase. Neste trabalho também foi observado que a condição de chaveamento da segunda fase pode ser analisada considerando circuitos não lineares separados para cada fase energizada, levando em conta a estrutura do núcleo e a ligação dos enrolamentos em delta (se houver).

37

#### 3.4 Metodologias para Distinguir e Detectar Correntes de Inrush

Existem atualmente, equipamentos de proteção que se prestam de modo eficiente à identificação da corrente de inrush, permitindo no caso de uma ocorrência, distingui-la da correspondente corrente de defeito.

Foi observado que a maioria dos pesquisadores buscam estudar o comportamento e a composição das correntes de inrush para cada vez mais otimizar algoritmos em relés com o intuito de minimizar interrupções indevidas destes, ou seja, deduzir se há presença de defeito ou não, uma vez que esses dois tipos de correntes podem ser similares em valores nominais ou em determinadas composições de harmônicos.

Devido à natureza assimétrica das correntes de inrush, diversos harmônicos surgem e são dominantes no espectro harmônico, em particular a segunda harmônica. Por causa desta característica distinta, qualquer defeito interno em um transformador pode ser detectado em termos da freqüência fundamental e das componentes de segunda harmônica, respectivamente. Tendo em vista essa idéia, Sykes e Morrison em 1972 [29], e posteriormente Schweitzer em 1977 [30] desenvolveram técnicas de filtros digitais em conjunto com microprocessadores para minimizar operações indevidas nos relés de proteção diferenciais de transformadores, durante as correntes de inrush. Porém, o projeto deste tipo de relé ainda depende de determinadas características e comportamentos das correntes de inrush, e o mais importante de todos, de sua composição em relação à segunda harmônica.

Um artigo publicado por P. C. Y. Ling e A Basak em 1988 [31], mostrou um trabalho o qual analisou a performance do conteúdo de segunda harmônica da corrente de inrush em um transformador monofásico e um trifásico, utilizando um método computacional no qual desenvolveu um novo algoritmo de detecção dos valores integrados de tempo real da corrente de inrush de magnetização no espaço de tempo de um ciclo, através do conteúdo de segunda harmônica presente ou não nessas correntes, onde desta forma, distingue as correntes de inrush das correntes de defeitos.

Basicamente, o modelo desenvolvido nesse trabalho foi usado para prever padrões de correntes de magnetização de inrush para qualquer combinação entre parâmetros de chaveamentos e conexões dos transformadores de distribuição de energia. Tal esquema pode ser adaptado para substituir o circuito de filtro de segunda harmônica usado nos relés diferenciais convencionais com restrição de segunda harmônica.

Neste trabalho, através de ensaios laboratoriais, concluiu-se que na energização de um transformador, dependendo da conexão dos enrolamentos, o surgimento do conteúdo de segunda harmônica da corrente de inrush não necessariamente ocorre no primeiro ciclo de tempo e sim logo após nos demais. Desta forma, dependendo da programação do algoritmo do relé, no primeiro ciclo da energização é provável que o mesmo atue indevidamente, pois não há tempo o suficiente para o surgimento da referida harmônica, desta forma, a corrente de inrush pode ser reconhecida como corrente de defeito no transformador.

Um outro tópico abordado nesse trabalho foi o "Fator de Espaço" do circuito magnético (WSF – Winding Space Factor), o qual é definido como a faixa da área seccional do núcleo de aço que não é magnética em um transformador. A **Figura 3.7** mostra o resultado laboratorial sobre a relação deste 'fator' no pico da corrente de inrush e da corrente de segunda harmônica no primeiro ciclo.

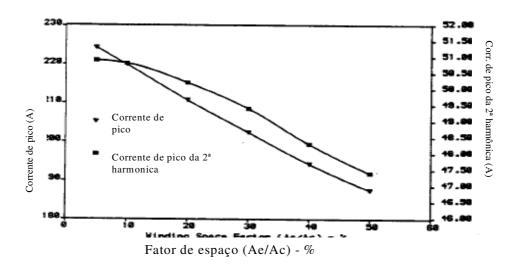


Figura 3.7 - Efeito do fator de espaço nas correntes de pico e de 2ª harmônica do 1º ciclo

Desta forma, concluiu-se que quanto maior for o Fator de Espaço do núcleo (WSF), menor será a resultante do pico total da corrente de inrush e, conseqüentemente, o conteúdo de segunda harmônica, respectivamente, em uma energização de um transformador. A tendência mostra uma redução linear na magnitude da corrente de inrush com o aumento desse espaçamento. Este tópico relaciona a evidência de que isso se intensifica quanto menor for a classe de tensão de um transformador, pois esses apresentam moderada isolação, onde o referido fator (WSF) tende a ser menor.

Em 2004, Omar Youssef, publicou um trabalho [32], o qual apresentou uma nova aproximação para classificação de defeitos em tempo real em sistemas de transmissão de energia e a identificação de correntes de inrush em transformadores de potencia utilizando uma aproximação de multi-critérios baseado na lógica Fuzzy [33 e 34], com um pré-processador de estágio baseado na transformada de Wavelet [35, 36 e 37]. Três entradas em função de três sinais de correntes são instaladas para detectar defeitos tipo fase-terra, fase-fase e dupla fase-terra bem como correntes de inrush, sendo que a técnica é baseada na utilização de componentes de baixas freqüências geradas durante as condições de defeitos no sistema elétrico e em correntes de inrush.

Conforme a referência [38], em 2005 Petit e Bastard apresentaram um artigo o qual trata de um relé de seqüência zero que permite ajustar a proteção de modo que, uma vez identificada a corrente de inrush, atue apenas no caso de ocorrência de um defeito permanente. Portanto, a análise contempla as seguintes correntes elétricas:

- Corrente de defeito ;
- Corrente de inrush com defeito;
- Corrente de inrush sem defeito.

O relé de sequência zero possui mecanismos de ajustes que permitem a atuação nas duas primeiras situações.

Basicamente, a operação deste relé é baseada no fato de que nos religamentos de um transformador, sempre há a corrente de inrush com componentes característicos similares a de seqüência zero, porém, com valores de freqüências distintas. Estas componentes podem surgir com

um determinado atraso após o instante do religamento, e consiste no período de tempo decorrido até a saturação do núcleo do transformador.

Para contemplar este aspecto, um algoritmo de restrição é utilizado considerando-se uma corrente de seqüência positiva de 100 Hz, e se fundamenta na avaliação do atraso correspondente da corrente induzida que é característica de ocorrências temporárias.

#### O algoritmo utiliza 3 (três) dados de entrada:

- Valor de referência para identificação da corrente de sequência zero na frequência de 50
   Hz;
- Valor de referência para identificação da corrente de sequência positiva na frequência de 100 Hz;
- Valor de referência para o atraso entre a ocorrência dos dois valores de identificação das correntes (nas freqüências de 100 Hz e 50 Hz).

#### Basicamente, o esquema lógico implementado consiste nos seguintes aspectos:

- No instante em que a corrente de sequência zero (50 Hz) atinge o valor de referência prédeterminado para identificação, um comparador gera um pulso com 20 ms de janela;
- Ocorre o mesmo em relação a corrente de sequência positiva (100 Hz);
- Os pulsos gerados são enviados à entrada de uma porta lógica XOR que impõe na saída um pulso com largura igual ao correspondente atraso dos sinais;
- Caso este atraso seja inferior ao valor de referência pré-determinado, uma última função lógica encarrega-se de gerar um pulso que abrirá o disjuntor, ou seja, obtém-se a identificação da corrente de inrush com o defeito, do contrário, tem-se uma corrente de inrush sem o defeito, portanto, nenhum pulso é gerado e o disjuntor permanecerá fechado.

A **figura 3.8**, extraída da referência [38], ilustra a análise de um caso em que há corrente de inrush num defeito temporário (portanto, deve ser sanada com a atuação do relé de religamento).

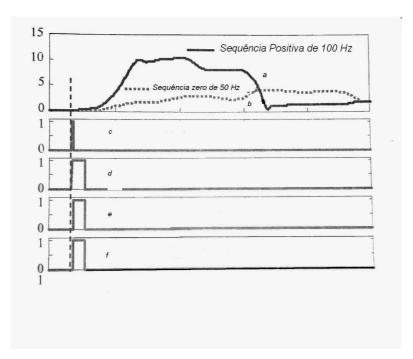


Figura 3.8: Identificação da corrente de inrush a partir do relé de seqüência zero através do algorítmo

Nesta figura podem ser observados os seguintes termos:

- <u>a</u> e <u>b</u> representam, respectivamente, a corrente induzida (frequência de 50 Hz) e a corrente de sequência positiva (frequência de 100 Hz);
- <u>c</u> representa o pulso gerado da duração (largura) correspondente ao atraso da corrente induzida de sequência zero;
- d representa o valor de referência para comparação do atraso decorrido entre a corrente de seqüência positiva e a corrente induzida de seqüência zero;
- e representa a identificação do intervalo de tempo em que o pulso gerado de atraso é maior que o valor de referência para comparação do atraso das correntes de seqüência positiva e zero, o que é característico do exemplo contemplado (obviamente, para o caso de defeito permanente, o pulso relativo ao atraso da corrente induzida de seqüência zero seria menor que o valor de referência para comparação dos atrasos);

 <u>f</u> representa o sinal gerado de controle de religamento do disjuntor. Nota-se que este sinal é nulo indicando que não deve haver abertura do disjuntor.

#### 3.5 Problemas causados pelas Correntes de Inrush

Neste tópico são abordados alguns trabalhos referentes aos principais problemas e consequências, os quais são causados pelas correntes de inrush no sistema elétrico em geral.

Em âmbito nacional, em 1995 foi publicado por H. Bronzeado um artigo [6] que investigou um fenômeno chamado interação simpática entre transformadores, o qual acontece quando um transformador é energizado ou conectado em um sistema, onde naturalmente é gerada corrente de inrush a qual pode saturar os outros transformadores já conectados. Esta saturação é estabilizada pela queda de tensão assimétrica ao longo da resistência da linha, gerando compensação de correntes de magnetização de alta magnitude desses transformadores já conectados onde, desta forma, há interações entre essas correntes e a corrente de inrush do transformador que está entrando, resultando nesta última, a alteração em sua magnitude e duração (longo decaimento), diferente do que geralmente esperado. A corrente de inrush prolongada pode gerar sobretensões harmônicas temporárias de longa duração, causando sérios problemas na operação do sistema elétrico como, por exemplo, atuações indevidas nos relés de proteção diferencial dos transformadores.

A duração e o impacto da interação simpática dependerá dos níveis de saturação alcançados pelos transformadores e do nível de dissipação de energia do sistema. Portanto, este fenômeno deve ser levado em conta principalmente quando são estudados os transitórios do sistema elétrico e sua coordenação de isolamento. É evidente que esta interação pode se tornar mais significativa quando o uso de transformadores modernos com material magnético de amorfo flexível ou bobinas supercondutoras serem intensificados.

Em 2001, foi publicado por Mohamed [39] um artigo o qual descreve as realizições de simulações das correntes de inrush em transformadores conectados em paralelo em uma subestação. As análises foram baseadas em expressões analíticas, tendo transformadores com curvas de magnetização não lineares e soluções numéricas das principais equações resultantes. Os resultados para chaveamentos em um transformador simples mostraram que a corrente de inrush é mais crítica se o chaveamento ocorrer quando a tensão de suprimento estiver no ponto zero da senoide (condição mais crítica do que se estiver no valor máximo).

No caso de chaveamento de um segundo transformador "T2" quando algum outro "T1" já estiver energizado (em vazio) pela barra, os resultados mostraram que este último não afeta consideravelmente o pico da corrente de inrush do segundo transformador. Ambos os transformadores necessitam de um tempo próximo de 2 ciclos para alcançar a forma simétrica da corrente de inrush. Se o transformador T1 tiver uma carga resistiva, no chaveamento do transformador T2 o pico da magnitude da corrente de inrush deste último será 50% menor, do que T1 estiver em vazio, sendo que em apenas uma metade de ciclo, a componente DC praticamente desaparece.

No chaveamento simultâneo dos dois transformadores, a composição "CC" das respectivas correntes de inrush tem as polaridades opostas e suas curvas de histerese idênticas. Se aumentar a impedância da fonte, resultará na redução da tensão nos terminais dos transformadores, e conseqüentemente, tende a reduzir o valor de pico e componentes de harmônicas dos dois transformadores. No caso da presença de capacitores na barra de suprimento, há uma tendência do aumento do valor de pico da corrente de inrush, bem como o aumento de suas componentes harmônicas.

Um artigo publicado em 1990 por Hamel, St-Jean e Paquette do Instituto de pesquisas da Hidro-Quebec no Canadá [40], analisou as principais causas nas operações indevidas de fusíveis em transformadores MT/BT em redes aéreas de distribuição, mediante pulsos de correntes induzidas por descargas atmosféricas. O objetivo foi propor métodos para reduzir essas operações observando a escolha de fusíveis e pára-raios instalados nos arranjos que compõem os transformadores nos postes.

Neste trabalho foi observado que com a incidência de descargas atmosféricas do tipo nuvem-terra, freqüentemente ocorrem surtos de tensões induzidas nas linhas de distribuição aéreas, e por conseqüência, correntes induzidas. Essas correntes que são normalmente de longo tempo e de baixas amplitudes (menor que 1kA), ao encontrar um conjunto de transformadores MT/BT se desviam em direção ao pára-raios (o qual protege o transformador e se aloca geralmente em paralelo a chave fusível) e produz uma tensão residual (i x R) durante o seu tempo total do pulso.

A tensão residual surgida durante o fenômeno descrito acima não deixa de ser uma sobretensão no transformador na qual satura o seu núcleo e que interage com o fluxo magnético já existente no equipamento e dependendo do seu valor, opõe-se à este provocando uma corrente de inrush, que na maioria das vezes é alta (similar a um valor de curto-circuito). Essa corrente de inrush surgida oferece uma grande probabilidade de queima do elo fusível protetor do transformador, dependendo do tempo de duração (aproximadamente 10 ms) e da curva de fusão do fusível. A queima do elo fusível por esse motivo é considerada indevida, pois geralmente não há presença de nenhum tipo de defeito, uma vez que a corrente de inrush é transitória.

Foram realizados testes laboratoriais simulando o fenômeno em questão, onde foram injetadas correntes de surto induzidas em diversas combinações de ligações entre transformadores, páraraios e fusíveis, no qual se concluiu que os pára-raios com base em Óxido de Zinco (*Zno*) produzem tensões residuais mais altas do que os de Carboneto de Silício (*Sic*) para pulsos de correntes induzidas abaixo de 1000 A onde, conseqüentemente, concluiu-se que no uso de páraraios a *Zno*, há maior probabilidade de queima do elo fusível na situação em questão.

As sugestões finais deste trabalho para reduzir queimas indevidas de elos fusíveis nas instalações em análises são:

- a) Escolher pára-raios com a menor faixa de tensão de operação possível, mas que não comprometa a tensão de operação e a confiabilidade do sistema;
- **b**) Para fusíveis de baixa corrente, escolher de preferência os que possuem curvas ou tempo de fusão retardados, ou escolher um fusível com o valor ligeiramente superior aos cálculos padronizados.

#### 3.6 Cargas frias em Redes de Distribuição

As correntes de inrush em carga fria são aquelas que surgem nos religamentos quando um determinado alimentador, bem como sua respectiva carga, esteve desligado por conta de eventos como reparo, manutenção preventiva, entre outros (período de pelo menos algumas horas), e não por conta de religamentos vinculados a atuação do sistema de proteção em ocorrências na rede (o que caracteriza o registro de correntes de inrush em carga quente).

A literatura revela que as correntes de carga fria tornaram-se notáveis há aproximadamente sessenta anos atrás, em 1940, mas não causou grandes preocupações devido a poucas cargas que geravam este tipo de condição no sistema. Os trabalhos publicados por Ramsur em 1952 [41] e posteriormente por Smithley em 1959 [42] foram os mais notáveis naquela época.

Devido ao aumento de cargas com motores, especialmente os residenciais na década de setenta, os pesquisadores voltaram suas atenções a este tópico, sendo que o trabalho com contribuições mais significativas foi publicado em 1979 por McDonald [43], o qual estudou a previsão do aumento da demanda de carga relacionada com interrupções de energia elétrica. Desta forma, após muitos esforços foram feitos na remodelagem da demanda de carga com elementos das redes distribuição.

A corrente de carga fria é um problema referente a energização de redes de distribuição, sobretudo com carga predominantemente residencial, devido ao fato de que as altas correntes de inrush que surgem são principalmente atribuídas à partida de motores. Os motores industriais são geralmente equipados com dispositivos de partida que diminuem essas correntes ou que desligam os mesmos na ocorrência de baixa tensão por alguns milisegundos ou, no máximo em alguns segundos logo após a interrupção do fornecimento. Ao contrário, os pequenos motores residenciais ou de aplicações similares não são equipados com esses dispositivos automáticos, e por esta razão, os estudos deste gênero são focados em cargas residenciais.

Seguindo este raciocínio, vários métodos foram desenvolvidos para estimar a corrente de carga fria, sendo que um dos mais notáveis foi publicado em 1989 por Hatziargyriou e Papadopoulos [44], no qual é analisada a resposta de partidas de motores em linhas de distribuição extensas. Este método consiste na agregação de cargas em cada ponto baseada na porcentagem da composição

típica do perfil de uma determinada carga, e um rápido método de fluxo de potência, particularmente ajustado para redes de distribuição radiais.

Tendo em vista a melhoria deste método, em 1991 estes mesmos autores realizaram um trabalho [45] o qual foi desenvolvido um programa computacional que pode ser usado para analisar qualquer tipo de alimentador de distribuição (residencial, industrial, comercial ou rural), desde que, seja conhecida a composição e a configuração de sua carga. O algoritmo deste programa é baseado em um método que considera como carga fria apenas os motores residenciais, pois cargas como lâmpadas, devido as suas filosofias de partidas, bem como cargas resistivas, não apresentam correntes de inrush com valores consideráveis.

Desta forma, o modelo é baseado na equação diferencial na **expressão 3.4** (derivada de interações entre equações eletromagnéticas e algébricas de circuitos equivalentes transitórios):

$$Ts = T_0 + \left(T_1 \cdot ws^k\right) \qquad (3.4)$$

Onde:

 $T_s$ : Torque do motor aproximado p/ o algoritmo

*To:* Torque de partida

**ωs:** Velocidade rotacional mecânica

**k:** Constante dependente do tipo de carga conforme referência [44]

*T1:* Torque real do motor

O programa foi testado em um alimentador classe 20kV com 65 km de extensão e com cargas residenciais, rurais e comerciais combinadas, onde se concluiu que o valor médio alcançado pela corrente de carga fria é aproximadamente 22 % da corrente em plena carga, com uma duração próxima de 2,5 segundos. O programa não leva em conta a queda de tensão gerada pela corrente de inrush ao longo do alimentador.

Em 1982 [46], Lang, Anderson e Fannin publicaram um trabalho no qual com base na magnitude e na duração, a corrente de carga fria foi caracterizada em quatro fases: inrush, partida de motores, aceleração de motores e correntes de fases "duradouras". A primeira fase (inrush) é devido ao fluxo de corrente no filamento de lâmpadas frias e da magnetização dos transformadores de

distribuição, e tem duração de alguns ciclos. A segunda fase (partida de motores), a corrente pode alcançar até 6 vezes o seu valor nominal, com a duração aproximada de 1 segundo. Na terceira fase (aceleração do motor) a corrente atinge o valor nominal do motor com uma duração próxima de 15 segundos. Na última e quarta fase que é devido à perda da diversidade entre as cargas controladas termostaticamente, é contínua até que a diversidade normal entre as cargas é restabelecida.

Os autores afirmaram que o valor e a duração da corrente depende de vários fatores como condições climáticas do tempo, a filosofia do uso das cargas pelos consumidores e a duração da interrupção de energia, sendo que, a corrente de carga nesta fase pode variar de 2 a 5 vezes da corrente de plena carga daquele horário.

Em 1985, Wilde [47] desenvolveu um trabalho pioneiro o qual analisou as características de transformadores e seus equipamentos de proteção, bem como os dos alimentadores de distribuição em relação à carga fria. Foram diagnosticados os efeitos da temperatura ambiente e a penetração do calor no espaço elétrico os quais resultam na perda da vida útil da isolação dos transformadores de distribuição durante a restauração do fornecimento de energia e o efeito do calor imediato nestes equipamentos. A relação entre a capacidade instalada versus as saturações críticas do espaço aquecido, para vários casos foram também estabelecidas.

Em 1990, Aubin e Bergeron [48] conduziram uma investigação para o carregamento dos transformadores de distribuição pelo desenvolvimento de um volumoso trabalho experimental sobre baixas temperaturas de ambiente. Eles generalizaram os resultados dos testes para estimar a condição térmica de um transformador sob corrente de carga fria, e geraram gráficos para avaliar a temperatura máxima de calor-imediato (hot-spot) e a perda da vida útil em relação ao carregamento inicial e duração da interrupção de energia.

Em 1995, Nehrirrethal [49] desenvolveu um modelo computacional para diagnosticar a magnitude da corrente de um alimentador com a carga em aquecimento. O modelo fisicamente se baseou no uso dos principais valores dos parâmetros de modelos residenciais.

Em 1996, Leou [50] produziu um modelo de regressão com dados extensivos coletados da Companhia Tai Power durante as interrupções de energia. Os modelos foram propostos a partir de

uma estimativa do carregamento do alimentador e também podem ser usados para modelagem em subestação. A importância desse modelo é que foi desenvolvido com dados reais de campo. O modelo final para transformadores de distribuição, bem como de alimentadores, baseado em medições reais de cargas, foi realizado por Lefebvre e Desbiens em 2002 [51]. O modelo foi comparado com o modelo generalizado para corrente de carga fria em alimentadores o qual foi desenvolvido em 1990 por Aubin, Bergeron e Morin [48].

Recentemente, visando pesquisar o estado da arte sobre os estudos e soluções para correntes de carga fria, os autores Kumar, I. Gupta e H. Gupta, em 2005 [52] publicaram um artigo o qual demonstra toda a teoria e experiências realizadas no mundo em relação a esta questão.

#### 3.7 Conclusão

De acordo com os artigos descritos nessa revisão bibliográfica, no que diz respeito a corrente de inrush pode-se observar que, a maioria dos autores e pesquisadores trabalham em direção a melhoria de equipamentos como transformadores, desempenho dos sistemas de proteção e algoritmos de relés digitais, com o objetivo de diminuir o número de interrupções em instalações ou sistemas elétricos, uma vez que essas correntes podem ser similares em valores nominais e composição de harmônicos em comparação com algumas correntes de curto-circuito em determinadas situações.

Desta forma não encontramos em nenhum trabalho ou artigo experimentos com informações reais retirados dos sistemas elétricos para se estimar valores (em magnitude) das correntes de inrush em alimentadores de distribuição de energia, bem como seus comportamentos de acordo com tipos de cargas, equipamentos ou perfis de alimentadores. Mesmo os artigos que estimam valores para as correntes de inrush em equipamentos como, por exemplo, transformadores, nas análises, apenas estudam e testam em um único equipamento, e não para um banco de transformadores ou outros equipamentos que possam produzir este fenômeno.

Nas concessionárias de energia como a Eletropaulo e CPFL, encontramos algumas metodologias de cálculos ou estimação das correntes de inrush, porém não há históricos de experimentos de campo para validação dessas técnicas.

# **CAPÍTULO 4**

# ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CARGA QUENTE

#### 4.1 Considerações Gerais

O principal objetivo deste capítulo consiste em fazer uma análise do modo tradicional de estimativa da corrente de inrush atualmente praticado na maioria das concessionárias de distribuição de energia elétrica no Brasil (neste estudo, trabalhou-se com informações referentes ao sistema elétrico distribuidor da AES ELETROPAULO). Neste capítulo será analisada a determinação das correntes de inrush em carga quente, ou seja, correntes oriundas das ocorrências onde o religamento foi bem sucedido com um tempo de interrupção relativamente curto (período menor que 1 minuto).

Esta análise foi baseada na utilização de fatores multiplicativos aplicados à corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador de média tensão, os quais ainda hoje são largamente utilizados nas concessionárias, pela rapidez e simplicidade de aplicação, embora na prática, haja alguns casos que demonstram que a estimativa da corrente de inrush obtida pode ser imprecisa por este método.

Conforme citado anteriormente, existem os fatores multiplicativos para o máximo valor da corrente de inrush que se trata de uma corrente de natureza transitória, mas o instante de referência para cálculo é em 16,66 ms. Tal instante foi adotado pela conveniência de abordagem em um ciclo embora, mais precisamente, o instante de referência normalmente adotado é de 10 ms onde o referido fator multiplicativo têm o valor próximo a 22 (vinte e dois), de acordo com o atual método tradicional em uso nas concessionárias.

Outro instante de referência adotado será o de 100 ms (6 ciclos), o qual pelo método tradicional têm o fator multiplicativo igual a 12 (doze).

#### 4.2 Metodologia Adotada

A estimativa dos fatores multiplicativos foi feita a partir da análise das correntes de inrush extraídas das medições em comparação com as correspondentes correntes de inrush obtidas através de cálculo elétrico teórico de acordo com o método tradicional.

Os medidores utilizados foram os da marca Power Measurement modelo 3720 [53], os quais atualmente estão instalados em 28 (vinte e oito) subestações da AES ELETROPAULO, e o período de medição contemplado foi entre Janeiro de 2004 e maio de 2005. As medições foram efetuadas na saída (disjuntor) dos alimentadores de distribuição em suas respectivas subestações.

Este medidor disponibiliza valores instantâneos de corrente e tensão nas fases e no neutro dos alimentadores num passo de amostragem de aproximadamente 1 ms, bem como seus respectivos registros de oscilografias. A **figura 4.1** representa um exemplo típico de uma amostra de oscilografia de uma corrente de inrush analisada neste trabalho. Essa amostra foi extraída de um medidor alocado na saída de um alimentador primário, conforme descrito no parágrafo anterior.

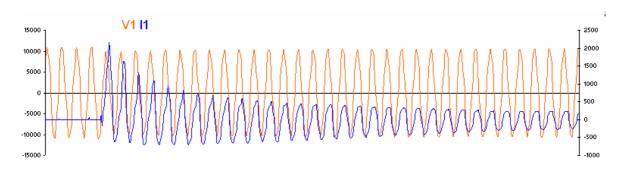


Figura 4.1: Amostra de uma oscilografia de uma corrente de inrush de um alimentador primário

Obs.: V1 – Oscilografia da tensão na fase '1';

I2 - Oscilografia da corrente de inrush na fase '1';

Tendo em vista que ao longo desta pesquisa trabalhou-se com valores RMS (valores eficazes das correntes), os dados das medições que originalmente são extraídos em valores instantâneos, foram tratados e convertidos para valores eficazes nos instantes de 1 e 6 ciclos, através do Método dos Trapézios [54].

Este método consiste na divisão da área sobre a curva em uma série de trapézios, os quais efetuando-se agregação, obtém-se a integral correspondente. Para exemplificar, considera-se a **figura 4.2**:

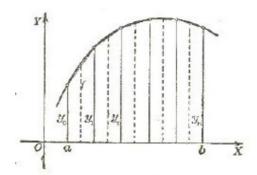


Figura 4.2: Área de uma curva sendo calculada pelo Método dos Trapézios

Desta forma, unem-se as extremidades das ordenadas por segmentos de retas, obtendo assim, trapézios. Cada um destes tem uma área expressa pelo produto da semi-soma das bases pela altura, de acordo com as **expressões 4.1 à 4.3**:

$$\frac{1}{2}(y_0 + y_I) \Delta x = \text{área do primeiro trapézio}$$
 (4.1)

$$\frac{1}{2}$$
.  $(y_1 + y_2) \Delta x = \text{área do segundo trapézio}$  (4.2)

$$\frac{1}{2}$$
.  $(y_{n-1} + y_n) \Delta x = \text{área do n-egésimo trapézio}$  (4.3)

Somando-se, obtém-se a equação geral do Método dos Trapézios, a qual enfim determina o valor total da área à ser calculada, conforme **expressão 4.4**:

Área = 
$$(\frac{1}{2}y_0 + y_1 + y_2 + ... + y_{n-1} + \frac{1}{2}y_n) \Delta x$$
 (4.4)

Quanto maior o número de intervalo de medição (no caso deste trabalho a cada 1 ms), mais próxima é a soma das áreas dos trapézios correspondentes a área sob a curva

Assim, considerando-se o exemplo anterior, calcularam-se as áreas correspondentes às formas de ondas das correntes de inrush detectadas a partir dos registros de medição, somando-se as respectivas áreas de trapézios, obtendo-se os resultados por ciclo, ou seja, do primeiro e do sexto ciclo de cada amostra.

Para se obter os valores eficazes ou RMS exatos das correntes de inrush, foi utilizado a **expressão 4.5** extraída da referência [55], para cada ciclo desejado (no caso deste trabalho foi calculado para o primeiro e sexto ciclo, respectivamente nos instantes 16,6 e 100 ms):

$$Irms = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} Ii^2.dt}$$
 (4.5)

Onde:

*Irms*: Corrente eficaz ou RMS

T e dt: Período de tempo o qual deseja-se obter o valor da corrente

*Ii*: Corrente (área) obtida através do Método dos Trapézios [54]

*t1*: Tempo inical

*t2*: Tempo final

Na parte teórica do cálculo da corrente de inrush foi utilizado o Programa Interprote, desenvolvido pelo ENERQ-USP (Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) estando, atualmente, a manutenção e desenvolvimento deste Programa a cargo da Daimon Engenharia e Sistemas (consultoria em estudos e desenvolvimento de sistemas direcionados à análise de redes de distribuição de energia elétrica). Este programa permite diversos estudos referentes aos ajustes dos sistemas e dispositivos de proteção da rede primária de distribuição. Abaixo estão descritos alguns dos recursos disponibilizados neste programa:

- Cálculo da corrente de inrush (através do método tradicional);
- Banco de dados para cadastro de dispositivos de proteção como fusíveis, relés, religadores automáticos, entre outros;
- Simulação de fluxo de potência, permitindo identificar o carregamento de cada trecho do alimentador em termos da corrente elétrica passante e demandas ativa, reativa e aparente, além do nível de tensão nas barras dos circuitos;
- Simulação de curto circuito permitindo identificar em cada barra da rede de média tensão,
   os valores das correntes de defeitos para os curto-circuitos monofásicos (fase-terra),
   bifásicos com ou sem impedância de defeito, e trifásicos;
- Simulação do ajuste da proteção e verificação dos coordenogramas resultantes;

- Recursos de visualização topológica dos circuitos, incluindo trechos, barras e equipamentos.

Desta forma, este programa adota o método tradicional no cálculo da corrente de inrush, onde são contemplados dois instantes de referência, bem como seus respectivos fatores multiplicativos:

- Instante 16,67 ms (1 ciclo): Fator multiplicativo igual a 22 (vinte e duas) vezes o valor da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador de média tensão;
- Instante 100 ms (6 ciclos): Fator multiplicativo igual a 12 (doze) vezes o valor da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador de média tensão.

# 4.3 Determinação das Correntes de Inrush em Carga Quente

Para a obtenção dos resultados deste tópico foram estudados 104 (cento e quatro) alimentadores de distribuição e uma amostra de 241 (duzentas e quarenta e uma) medições das oscilografias das correntes de inrush de cargas quentes.

Nesta análise não foram consideradas as correntes de inrush oriundas de religamentos de defeitos permanentes registrados pelo medidor Power 3720, pois nas medições desses tipos de ocorrências, há uma grande probabilidade de existir corrente de defeito somada com corrente de inrush, assim comprometendo o resultado do objetivo do estudo.

Neste contexto, visando compatibilizar os dados comparados com respeito à topologia e carregamento dos alimentadores considerados, inicialmente fez-se uma verificação no banco de dados de ocorrência da AES ELETROPAULO com o intuito de se certificar que não houveram trechos isolados ou queima de fusíveis nas ocorrências analisadas.

#### A metodologia adotada consistiu nos seguintes passos:

- a) Escolha dos 104 alimentadores com registro de medição a partir do medidor Power 3720, que seguiu um critério de levantamento do maior número de ocorrências capturadas considerando-se os circuitos das subestações que contém este medidor;
- **b**) Identificação nos arquivos de saída do medidor Power 3720 dos eventos que tiveram religamento bem sucedido;
- c) Cálculo das correntes de Inrush através do Programa Interprote;
- **d**) Através dos resultados de corrente de inrush obtidos por meio do Programa Interprote, foram determinadas as respectivas correntes nominais do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador em questão;
- e) Através da obtenção da corrente nominal e da corrente de inrush observada no medidor Power 3720, estimaram-se os fatores multiplicativos ajustados como variáveis probabilísticas que conduzem o cálculo da corrente de inrush aos valores (em magnitude) efetivamente medidos.

# **4.3.1** Apresentação dos Resultados das Correntes de Inrush em Cargas Quentes

Neste item são apresentados os resultados obtidos através da análise descrita no item anterior.

#### 4.3.1.1 Subestação Anchieta (ANC)

Foram estudados 8 (oito) alimentadores da <u>Subestação Anchieta</u> conforme mostra a **tabela 4.1**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.1: Resultados obtidos para a SE Anchieta

		I inrush Power	` '	I inrusl Interp	` /			
Cii4-	D-4-	т	т	т	т	T	K <sub>16.66</sub>	$K_{100}$
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	ms	ms
ANC-104	27/05/04	1437	382	17038	9613	801,1	1,79	0,48
ANC-104	24/11/04	1415	355	17038	9613	801,1	1,77	0,44
ANC-104	09/12/04	251	168	17038	9613	801,1	0,31	0,21
ANC-104	21/02/05	1608	467	17038	9613	801,1	2,01	0,58
ANC-106	21/01/04	1160	503	3731	2106	175,5	6,61	2,87
ANC-107	28/09/04	1087	456	15888	8962	746,8	1,46	0,61
ANC-107	25/01/05	1016	401	15888	8962	746,8	1,36	0,54
ANC-107	25/01/05	1339	409	15888	8962	746,8	1,79	0,55
ANC-107	04/02/05	351	192	15888	8962	746,8	0,47	0,26
ANC-107	11/02/05	1152	372	15888	8962	746,8	1,54	0,50
ANC-108	19/07/04	799	402	6919	3910	325,8	2,45	1,23
ANC-108	01/09/04	871	403	6919	3910	325,8	2,67	1,24
ANC-108	04/02/05	304	212	6919	3910	325,8	0,93	0,65
ANC-109	03/02/04	852	378	3323	1875	156,3	5,45	2,42
ANC-109	04/02/05	229	183	3323	1875	156,3	1,47	1,17
ANC-111	19/07/04	380	237	9501	5365	447,1	0,85	0,53
ANC-113	29/12/04	211	78	11958	6742	561,8	0,38	0,14
ANC-113	04/01/05	1161	211	11958	6742	561,8	2,07	0,38
ANC-113	04/02/05	202	77	11958	6742	561,8	0,36	0,14
ANC-114	25/09/04	327	94	6146	3478	289,8	1,13	0,32
ANC-114	29/12/04	259	75	6146	3478	289,8	0,89	0,26

**Observação:** Em relação à tabela 4.1, a nomenclatura das colunas indica os seguintes parâmetros:

- Circuito: Código de identificação do alimentador de média tensão analisado;
- **Data:** Informação do dia, mês e ano da ocorrência;
- I inrush (Power 3720): Identifica as correntes de inrush em ampéres registradas pelo medidor Power 3720 na data respectiva. As correntes medidas referem-se aos instantes 16,66 (1 ciclo) e 100 ms (6 ciclos);
- I (Cálculo Elétrico): Identifica as correntes de inrush em ampéres calculadas a partir de cálculo elétrico de redes (conforme mencionado, utilizou-se o Software Interprote). As correntes calculadas referem-se aos instantes 16,66 (1 ciclo) e 100 ms (6 ciclos);
- Inom.: Representa a corrente nominal em ampéres do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador de média tensão em análise;
- $K_{10 \text{ ms}}$ : Representa o fator multiplicativo ajustado que deve ser aplicado à corrente nominal para se obter um valor calculado referente ao instante 16,66 ms (1 ciclo) igual ao correspondente valor medido;
- $K_{100 \text{ ms}}$ : Representa o fator multiplicativo ajustado que deve ser aplicado à corrente nominal para se obter um valor calculado referente ao instante 100 ms (6 ciclos) igual ao correspondente valor medido.

#### 4.3.1.2 Subestação Taboão da Serra (TSE)

Foram analisados 2 (dois) alimentadores da <u>Subestação Taboão da Serra</u> conforme mostra a **tabela 4.2**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.2: Resultados obtidos para a SE Taboão da Serra

		I inrush Power	` '	I inrusl Cálculo l	` '			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
TSE-102	31/05/04	1420	719	44000	21120	1760,0	0,8	0,41
TSE-102	10/07/04	1892	838	44000	21120	1760,0	1,1	0,48
TSE-102	18/09/04	2064	806	44000	21120	1760,0	1,2	0,46
TSE-102	16/10/04	1847	578	44000	21120	1760,0	1,0	0,33
TSE-102	16/10/04	1847	578	44000	21120	1760,0	1,0	0,33
TSE-102	11/11/04	2409	920	44000	21120	1760,0	1,4	0,52
TSE-102	28/11/04	1518	769	44000	21120	1760,0	0,9	0,44
TSE-102	05/12/04	1503	783	44000	21120	1760,0	0,9	0,44
TSE-102	03/01/05	2210	750	44000	21120	1760,0	1,3	0,43
TSE-104	05/01/04	1562	612	9000	4320	360,0	4,3	1,70
TSE-104	17/01/04	1396	606	9000	4320	360,0	3,9	1,68
TSE-104	16/07/04	796	507	9000	4320	360,0	2,2	1,41

# 4.3.1.3 Subestação Embu (EMB)

Foram analisados 5 (cinco) alimentadores da <u>Subestação Embu</u> conforme mostra a **tabela 4.3**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.3: Resultados obtidos para a SE Embu

		I inrush Power		I inrush (A) - Interprote				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
EMB-106	18/11/04	781	493	44367	21104	1758,7	0,44	0,28
EMB-108	27/07/04	1135	611	11539	5618	468,2	2,42	1,31
EMB-108	27/07/04	1271	529	11539	5618	468,2	2,71	1,13
EMB-108	04/09/04	1556	636	11539	5618	468,2	3,32	1,36
EMB-108	08/10/04	1507	725	11539	5618	468,2	3,22	1,55
EMB-108	11/10/04	1161	518	11539	5618	468,2	2,48	1,11
EMB-108	26/12/04	1518	622	11539	5618	468,2	3,24	1,33
EMB-112	10/07/04	1585	720	18791	9148	762,3	2,08	0,94

Tabela 4.3: Resultados obtidos para a SE Embu

		I inrush Power	` /	I inrush (A) - Interprote				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
EMB-112	11/07/04	977	695	18791	9148	762,3	1,28	0,91
EMB-112	18/08/04	1652	848	18791	9148	762,3	2,17	1,11
EMB-112	31/08/04	1330	789	18791	9148	762,3	1,74	1,03
EMB-112	18/11/04	1645	954	18791	9148	762,3	2,16	1,25
EMB-112	25/11/04	890	734	18791	9148	762,3	1,17	0,96
EMB-114	12/09/04	1586	570	17526	8337	694,8	2,28	0,82
EMB-114	10/11/04	1361	722	17526	8337	694,8	1,96	1,04
EMB-115	18/09/04	1179	810	16347	7959	663,3	1,78	1,22

# 4.3.1.4 Subestação Mandaqui (MAD)

Foi analisado 1 (um) alimentador da Subestação Mandaqui\_conforme mostra a **tabela 4.4**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.4: Resultados obtidos para a SE Mandaqui

_		I inrush Power		I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
MAD-103	28/08/04	692	537	7086	3371	280,9	2,46	1,91
MAD-103	14/01/05	1515	546	7086	3371	280,9	5,39	1,94

#### 4.3.1.5 Subestação Monções (MOC)

Foram analisados 7 (sete) alimentadores da <u>Subestação Monções</u> conforme mostra a **tabela 4.5**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.5: Resultados obtidos para a SE Monções

		I inrusl Power	` /	I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
MOC-102	10/05/04	1132	476	26026	14693	1224,4	0,92	0,39
MOC-105	26/11/04	2038	833	14918	8456	704,7	2,89	1,18
MOC-108	12/09/04	1975	683	21831	12326	1027,2	1,92	0,66
MOC-109	27/09/04	1770	824	19091	10809	900,8	1,97	0,91
MOC-109	27/09/04	2272	813	19091	10809	900,8	2,52	0,90
MOC-109	25/02/05	2056	854	19091	10809	900,8	2,28	0,95
MOC-109	08/04/05	1859	794	19091	10809	900,8	2,06	0,88
MOC-110	15/05/04	1569	517	9018	5094	424,5	3,70	1,22
MOC-110	01/01/05	1424	392	9018	5094	424,5	3,35	0,92
MOC-111	08/07/04	1583	569	5695	3361	280,1	5,65	2,03
MOC-114	09/08/04	1309	475	3492	1977	164,8	7,95	2,88

#### 4.3.1.6 Subestação Piraporinha (PIP)

Foram analisados 2 (dois) alimentadores da <u>Subestação Piraporinha</u> conforme mostra a **tabela 4.6**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.6: Resultados obtidos para a SE Piraporinha

		I inrush Power		I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
PIP-103	04/07/04	731	402	13462	7607	633,9	1,15	0,63
PIP-103	31/08/04	1436	541	13462	7607	633,9	2,27	0,85
PIP-104	18/05/04	1104	301	22321	12596	1049,7	1,05	0,29

# 4.3.1.7 Subestação Parelheiros (PRE)

Foram analisados 4 (quatro) alimentadores da <u>Subestação Parelheiros</u> conforme mostra a **tabela 4.7**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.7: Resultados obtidos para a SE Parelheiros

		I inrush	(A) –	I inrusł	ı (A) –			
		Power	3720	Cálculo 1	Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100\;ms}$
PRE-102	01/11/04	1046	353	11101	6292	524,3	1,99	0,67
PRE-104	25/08/04	1023	525	11893	6730	560,8	1,82	0,94
PRE-105	08/08/04	951	649	9446	5348	445,7	2,13	1,46
PRE-105	25/08/04	893	598	9446	5348	445,7	2,00	1,34
PRE-107	19/04/04	520	161	10284	5811	484,3	1,07	0,33
PRE-107	17/05/04	780	159	10284	5811	484,3	1,61	0,33
PRE-107	04/06/04	1029	196	10284	5811	484,3	2,12	0,40
PRE-107	18/06/04	909	171	10284	5811	484,3	1,88	0,35
PRE-107	08/07/04	934	164	10284	5811	484,3	1,93	0,34
PRE-107	25/08/04	612	139	10284	5811	484,3	1,26	0,29
PRE-107	24/09/04	650	173	10284	5811	484,3	1,34	0,36
PRE-107	17/10/04	824	169	10284	5811	484,3	1,70	0,35
PRE-107	25/10/04	712	201	10284	5811	484,3	1,47	0,42
PRE-107	19/11/04	793	225	10284	5811	484,3	1,64	0,46
PRE-107	06/12/04	749	198	10284	5811	484,3	1,55	0,41

#### 4.3.1.8 Subestação Rio Grande (RGR)

Foi analisado 1 (um) alimentador da <u>Subestação Rio Grande</u> conforme a **tabela 4.8**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.8: Resultados obtidos para a SE Rio Grande

		I inrush Power	` '	I inrush Cálculo l	` ′			
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I 100 ms	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
RGR-105	05/02/04	1452	432	13274	7510	625,8	2,32	0,69
RGR-105	18/09/04	1228	405	13274	7510	625,8	1,96	0,65

### 4.3.1.9 Subestação Lubeca (LUB)

Foram analisados 5 (cinco) alimentadores da <u>Subestação Lubeca</u> conforme mostra a **tabela 4.9**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.9: Resultados obtidos para a SE Lubeca

	I inrush (A) – I inrush (A) – Power 3720 Cálculo Elétrico		` ′					
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom.	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
LUB-106	07/01/2004	597	336	6171	3490	290,8	2,05	1,16
LUB-106	04/04/2004	839	338	6171	3490	290,8	2,88	1,16
LUB-110	18/01/2004	1126	691	25362	14336	1194,7	0,94	0,58
LUB-110	21/09/2004	1021	475	25362	14336	1194,7	0,85	0,4
LUB-110	17/11/2004	2238	654	25362	14336	1194,7	1,87	0,55
LUB-111	11/03/2004	1171	711	12535	7102	591,8	1,98	1,2
LUB-111	25/04/2004	1002	604	12535	7102	591,8	1,69	1,02
LUB-111	13/10/2004	1227	674	12535	7102	591,8	2,07	1,14
LUB-111	07/11/2004	1014	639	12535	7102	591,8	1,71	1,08
LUB-113	08/01/2004	1037	653	12645	7135	594,6	1,74	1,1
LUB-113	10/01/2004	803	608	12645	7135	594,6	1,35	1,02

Tabela 4.9: Resultados obtidos para a SE Lubeca

			1 (A) – 3720	I inrus Cálculo	h (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
LUB-113	06/04/2004	977	612	12645	7135	594,6	1,64	1,03
LUB-115	18/03/2004	859	728	19782	11197	933,1	0,92	0,78
LUB-115	240/4/2004	821	628	19782	11197	933,1	0,88	0,67
LUB-115	31/05/2004	898	745	19782	11197	933,1	0,96	0,8
LUB-115	12/09/2004	827	594	19782	11197	933,1	0,89	0,64
LUB-115	18/11/2004	899	687	19782	11197	933,1	0,96	0,74

## 4.3.1.10 Subestação Itaquera (ITR)

Foram analisados 3 (três) alimentadores da <u>Subestação Itaquera</u> conforme mostra a **tabela 4.10**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.10: Resultados obtidos para a SE Itaquera

		I inrush Power	` '	` '				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
ITR-103	12/09/04	1709	412	10776	6087	507,3	3,37	0,81
ITR-113	01/01/04	829	293	10763	6093	507,8	1,63	0,58
ITR-114	30/03/04	1137	388	5153	2916	243,0	4,68	1,60

#### 4.3.1.11 Subestação Jordanésia (JOR)

Foram analisados 5 (cinco) alimentadores da <u>Subestação Jordanésia</u> conforme mostra a **tabela 4.11**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.11: Resultados obtidos para a SE Jordanésia

	I inrush (A) – I inrush (A) – Power 3720 Cálculo Elétric		` '					
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
JOR-102	09/12/03	1289	567	21574	12165	1013,8	1,27	0,56
JOR-102	06/04/04	1465	562	21574	12165	1013,8	1,45	0,55
JOR-102	25/04/04	905	375	21574	12165	1013,8	0,89	0,37
JOR-103	26/10/03	790	247	8419	4758	396,5	1,99	0,62
JOR-103	06/11/04	880	248	8419	4758	396,5	2,22	0,63
JOR-104	20/08/03	860	296	16236	9203	766,9	1,12	0,39
JOR-105	26/10/03	826	333	14102	7979	664,9	1,24	0,50
JOR-106	26/10/03	348	126	21839	12343	1028,6	0,34	0,12

#### 4.3.1.12 Subestação Comandante Taylor (CTA)

Foram analisados 6 (alimentadores) alimentadores da <u>Subestação Comandante Taylor</u> conforme mostra a **tabela 4.12**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.12: Resultados obtidos para a SE Comandante Taylor

I inrush (A) – I inrush (A) –

		Power	3720	Cálculo l	Elétrico			
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
CTA-102	15/11/04	1494	442	10358	5855	487,9	3,06	0,91
CTA-107	29/01/04	1265	591	10523	5859	488,3	2,59	1,21
CTA-108	02/02/04	1135	642	16021	9051	754,3	1,50	0,85
CTA-108	04/08/04	1319	623	16021	9051	754,3	1,75	0,83
CTA-108	24/12/04	1490	889	16021	9051	754,3	1,98	1,18
CTA-108	24/12/04	1490	889	16021	9051	754,3	1,98	1,18
CTA-108	29/12/04	1201	699	16021	9051	754,3	1,59	0,93
CTA-110	04/02/04	1635	453	20552	11613	967,8	1,69	0,47
CTA-110	13/06/04	1131	355	20552	11613	967,8	1,17	0,37
CTA-110	13/06/04	1175	384	20552	11613	967,8	1,21	0,40
CTA-113	15/05/04	1040	376	16452	9316	776,3	1,34	0,48
CTA-113	19/07/04	1429	434	16452	9316	776,3	1,84	0,56
CTA-113	28/08/04	1108	386	16452	9316	776,3	1,43	0,50
CTA-114	21/08/04	1082	365	24282	13725	1143,8	0,95	0,32

#### 4.3.1.13 Subestação Diadema (DIA)

Foram analisados 4 (quatro) alimentadores da <u>Subestação Diadema</u> conforme mostra a **tabela 4.13**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.13: Resultados obtidos para a SE Diadema

		I inrush Power		I inrush Cálculo l	` '			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
DIA-105	09/09/04	1058	604	23518	13317	1109,8	0,95	0,54
DIA-106	11/01/04	650	294	32108	18080	1506,7	0,43	0,20
DIA-113	31/07/04	1119	372	13306	7511	625,9	1,79	0,59
DIA-114	13/01/04	1198	539	27314	15451	1287,6	0,93	0,42
DIA-114	26/01/04	786	452	27314	15451	1287,6	0,61	0,35
DIA-114	10/02/04	1147	700	27314	15451	1287,6	0,89	0,54

#### 4.3.1.14 Subestação Campestre (CPE)

Foram analisados 6 (seis) alimentadores da <u>Subestação Campestre</u> conforme mostra a **tabela 4.14**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.14: Resultados obtidos para a SE Campestre

		I inrush (A) – Power 3720		I inrust Cálculo l				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
CPE-105	19/04/04	229	114	5906	3327	277,3	0,83	0,41
CPE-107	19/04/04	189	97	10225	5764	480,3	0,39	0,20
CPE-109	28/08/04	1848	552	13250	7503	625,3	2,96	0,88
CPE-111	19/04/04	529	341	8104	4600	383,3	1,38	0,89
CPE-111	25/09/04	848	406	8104	4600	383,3	2,21	1,06
CPE-113	13/07/04	1024	562	10003	5660	471,7	2,17	1,19
CPE-113	20/09/04	465	275	10003	5660	471,7	0,99	0,58
CPE-115	19/04/04	519	296	8220	4652	387,7	1,34	0,76
CPE-115	20/09/04	698	402	8220	4652	387,7	1,80	1,04

#### 4.3.1.15 Subestação Carrão (CRA)

Foram analisados 11 (onze) alimentadores da <u>Subestação Carrão</u> conforme mostra a **tabela 4.15**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.15: Resultados obtidos para a SE Carrão

		I inrush (A) – Power 3720		I inrush Cálculo l				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100\;ms}$
CRA-102	19/01/04	1558	540	6942	3920	326,7	4,77	1,65
CRA-102	30/01/04	1106	432	6942	3920	326,7	3,39	1,32
CRA-102	29/06/04	859	380	6942	3920	326,7	2,63	1,16
CRA-103	09/02/04	1187	534	14234	8048	670,7	1,77	0,80
CRA-103	12/09/04	1279	418	14234	8048	670,7	1,91	0,62
CRA-103	13/09/04	1085	504	14234	8048	670,7	1,62	0,75
CRA-103	21/09/04	1081	524	14234	8048	670,7	1,61	0,78
CRA-104	02/02/04	1186	454	10065	5695	474,6	2,50	0,96
CRA-105	30/01/04	1056	399	12805	7238	603,2	1,75	0,66
CRA-107	15/05/04	467	259	15387	8692	724,3	0,64	0,36
CRA-108	04/02/04	873	390	16164	9121	760,1	1,15	0,51
CRA-108	15/05/04	569	381	16164	9121	760,1	0,75	0,50
CRA-110	05/08/04	1313	445	5960	3364	280,3	4,68	1,59
CRA-110	14/11/04	1137	434	5960	3364	280,3	4,06	1,55
CRA-111	30/10/04	1755	483	9176	5175	431,3	4,07	1,12
CRA-112	15/05/04	500	310	8239	4631	385,9	1,30	0,80
CRA-114	21/02/04	1403	375	14275	8070	672,5	2,09	0,56
CRA-115	08/07/04	1903	610	12833	7252	604,3	3,15	1,01

#### 4.3.1.16 Subestação Butantã (BUT)

Foram analisados 5 (cinco) alimentadores da <u>Subestação Butantã</u> conforme mostra a **tabela 4.16**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.16: Resultados obtidos para a SE Butantã

		I inrush Power		I inrush Cálculo l				
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
BUT-102	17/08/04	1449	475	15926	8997	749,8	1,93	0,63
BUT-103	19/07/04	1458	429	18028	10157	846,4	1,72	0,51
BUT-103	10/09/04	1669	589	18028	10157	846,4	1,97	0,70
BUT-106	25/01/04	1454	499	23058	13043	1086,9	1,34	0,46
BUT-108	30/01/04	1466	670	19813	11198	933,2	1,57	0,72
BUT-112	19/02/04	1275	679	19278	10901	908,4	1,40	0,75

# 4.3.1.17 Subestação Clementino (CLE)

Foram analisados 5 (cinco) alimentadores da <u>Subestação Clementino</u> conforme mostra a **tabela 4.17**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.17: Resultados obtidos para a SE Clementino

		I inrush Power	` ′	I inrusł Cálculo l	` '			
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
CLE-102	23/01/04	1177	412	10825	6109	509,1	2,31	0,81
CLE-102	09/01/05	1494	412	10825	6109	509,1	2,93	0,81
CLE-103	07/12/04	102	42	4545	2572	214,3	0,48	0,20
CLE-105	04/10/04	1744	499	19795	11156	929,7	1,88	0,54
CLE-105	07/12/04	971	366	19795	11156	929,7	1,04	0,39
CLE-105	27/02/05	1246	370	19795	11156	929,7	1,34	0,40
CLE-112	22/05/04	921	433	16363	9254	771,2	1,19	0,56
CLE-114	12/09/04	1099	477	18803	10631	885,9	1,24	0,54

#### 4.3.1.18 Subestação Buenos Aires (BAI)

Foram analisados 5 (cinco) alimentadores da <u>Subestação Buenos Aires</u> conforme mostra a **tabela 4.18**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.18: Resultados obtidos para a SE Buenos Aires

		I inrush Power	` '	I inrush Cálculo l	` ′			
Circuito	Data	I 16.66 ms	I 100 ms	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
BAI-104	24/07/04	1028	518	15375	8679	723,3	1,42	0,72
BAI-107	08/07/04	1031	558	13259	7486	623,8	1,65	0,89
BAI-107	09/07/04	1597	546	13259	7486	623,8	2,56	0,88
BAI-108	28/08/04	1206	511	15000	8472	706,0	1,71	0,72
BAI-110	25/07/04	1329	486	11051	6258	521,5	2,55	0,93
BAI-112	22/05/04	524	189	2534	1430	119,2	4,40	1,59

#### 4.3.1.19 Subestação Bartira (BAR)

Foram analisados 11 (onze) alimentadores da <u>Subestação Bartira</u> conforme mostra a **tabela 4.19**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.19: Resultados obtidos para a SE Bartira

		I inrus Powei	` '	I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
BAR-102	18/01/2004	1391	668	9401	5306	442,2	3,15	1,51
BAR-102	13/11/2004	1243	566	9401	5306	442,2	2,81	1,28
BAR-103	21/01/2004	1337	641	16694	9446	787,2	1,7	0,81
BAR-103	09/02/2005	1033	474	16694	9446	787,2	1,31	0,6
BAR-104	25/02/2005	1537	637	7359	4165	347,1	4,43	1,84
BAR-105	12/09/2004	512	222	3610	2037	169,8	3,02	1,31
BAR-105	08/12/2004	952	334	3610	2037	169,8	5,61	1,97

Tabela 4.19: Resultados obtidos para a SE Bartira

		I inrus Powei	` ′	I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
BAR-107	6/2/2004	1132	402	5703	3231	269,3	4,2	1,49
BAR-107	3/12/2004	1534	466	5703	3231	269,3	5,7	1,73
BAR-107	6/3/2005	822	451	5703	3231	269,3	3,05	1,68
BAR-108	21/1/2004	817	414	5646	3189	265,8	3,07	1,56
BAR-108	5/4/2004	844	407	5646	3189	265,8	3,18	1,53
BAR-108	10/6/2004	714	375	5646	3189	265,8	2,69	1,41
BAR-108	10/10/2004	658	389	5646	3189	265,8	2,48	1,46
BAR-108	21/11/2004	1049	408	5646	3189	265,8	3,95	1,54
BAR-108	8/12/2004	1612	558	5646	3189	265,8	6,07	2,1
BAR-109	12/1/2004	1407	650	7680	4349	362,4	3,88	1,79
BAR-109	30/1/2004	845	531	7680	4349	362,4	2,33	1,47
BAR-109	29/5/2004	1195	552	7680	4349	362,4	3,3	1,52
BAR-109	30/10/2004	1499	613	7680	4349	362,4	4,14	1,69
BAR-109	22/2/2005	1533	654	7680	4349	362,4	4,23	1,8
BAR-110	26/4/2004	1188	599	7383	4161	346,8	3,43	1,73
BAR-110	20/6/2004	1188	599	7383	4161	346,8	3,43	1,73
BAR-110	7/7/2004	1156	470	7383	4161	346,8	3,33	1,36
BAR-110	16/7/2004	1177	539	7383	4161	346,8	3,39	1,55
BAR-110	29/9/2004	1085	603	7383	4161	346,8	3,13	1,74
BAR-111	30/1/2004	1187	443	6502	3672	306	3,88	1,45
BAR-111	30/1/2004	1124	608	6502	3672	306	3,67	1,99
BAR-111	30/5/2004	1259	513	6502	3672	306	4,11	1,68
BAR-111	14/11/2004	1272	560	6502	3672	306	4,16	1,83
BAR-111	15/11/2004	827	399	6502	3672	306	2,7	1,3
BAR-111	16/11/2004	1267	507	6502	3672	306	4,14	1,66
BAR-112	8/7/2004	1005	587	10766	6087	507,3	1,98	1,16
BAR-112	8/7/2004	955	492	10766	6087	507,3	1,88	0,97
BAR-112	25/8/2004	798	679	10766	6087	507,3	1,57	1,34
BAR-113	9/1/2004	1348	809	9723	5482	456,8	2,95	1,77
BAR-113	7/7/2004	1080	380	9723	5482	456,8	2,36	0,83
BAR-114	29/1/2004	1549	735	11957	6750	562,5	2,75	1,31
BAR-114	25/8/2004	1152	590	11957	6750	562,5	2,05	1,05

BAR-114 4/11/2004

BAR-114 15/11/2004

BAR-115 13/1/2004

BAR-115 23/1/2004

1427

1273

1396

1092

483

414

881

623

11957

11957

10559

10559

562,5

562,5

498,4

498,4

6750

6750

5981

5981

2,54

2,26

2,8

2,19

0,86

0,74

1,77

1,25

Tabela 4.19: Resultados obtidos para a SE Bartira

			h (A) – r 3720	- I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
BAR-115	25/1/2004	1545	683	10559	5981	498,4	3,1	1,37
BAR-115	25/1/2004	770	607	10559	5981	498,4	1,54	1,22
BAR-115	15/4/2004	1357	544	10559	5981	498,4	2,72	1,09
BAR-115	10/7/2004	996	556	10559	5981	498,4	2	1,12
BAR-115	19/7/2004	1204	507	10559	5981	498,4	2,42	1,02
BAR-115	18/9/2004	1336	599	10559	5981	498,4	2,68	1,2
BAR-115	7/3/2005	1241	670	10559	5981	498,4	2,49	1,34

# 4.3.1.20 Subestação Barra Funda (BFU)

Foram analisados 8 (oito) alimentadores da <u>Subestação Barra Funda</u> conforme mostra a **tabela 4.20**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 4.20: Resultados obtidos para a SE Barra Funda

		I inrush Power	` /	I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
BFU-102	14/01/04	1057	306	8817	4984	415,3	2,54	0,74
BFU-105	07/04/04	1629	569	20857	11825	985,4	1,65	0,58
BFU-105	02/09/04	1240	576	20857	11825	985,4	1,26	0,58
BFU-105	02/09/04	1563	560	20857	11825	985,4	1,59	0,57
BFU-108	29/05/04	937	476	13918	7858	654,8	1,43	0,73
BFU-109	07/08/04	827	463	9619	5443	453,6	1,82	1,02
BFU-111	29/07/04	1156	389	7421	4203	350,3	3,30	1,11
BFU-112	07/01/04	1455	472	7772	4388	365,7	3,98	1,29
BFU-112	10/12/04	1388	530	7772	4388	365,7	3,80	1,45
BFU-113	16/11/04	1053	509	7650	4326	360,5	2,92	1,41
BFU-114	07/01/04	1240	399	8099	4580	381,7	3,25	1,05
BFU-114	07/08/04	654	329	8099	4580	381,7	1,71	0,86

#### 4.3.2 Análise dos Resultados

Conforme já citado, o modelo de cálculo elétrico implementado no Programa Interprote e utilizado nas análises descritas anteriormente para avaliação da corrente de inrush consiste na utilização de fatores multiplicativos pré-estabelecidos (ou seja, valores fixos não configuráveis) em 22 e 12, respectivamente aos instantes de 10 e 100 ms (6 ciclos), aplicados à corrente nominal referente ao conjunto de transformadores atendidos pelo circuito em estudo. Este procedimento de cálculo está em conformidade com a sistemática utilizada por diversas concessionárias de distribuição de energia elétrica brasileiras no que tange à estimativa da corrente de inrush em situações de religamento.

Pode-se afirmar que a corrente de inrush calculada pelo Software Interprote é muito maior que a registrada pelo medidor Power 3720, pois em todos os 241 (duzentos e quarenta e um) casos de eventos analisados e expostos nas tabelas **4.1** a **4.20**, comparando-se os valores de corrente de inrush medido e os calculados pelo Interprote, claramente se observa que os fatores multiplicativos utilizados majoram significativamente os resultados obtidos pelo programa.

De acordo com o **Capítulo 2** (dois), a magnitude deste parâmetro depende de fatores como o instante de religamento, potência de curto de circuito no ponto de ocorrência, fluxo residual, potência nominal dos transformadores, entre outros. No instante de religamento, se a tensão correspondente for nula, o fluxo residual será máximo e o pico do fluxo transitório no núcleo será mais que o dobro da condição de fluxo normal, desta forma gerando uma corrente de inrush assimétrica e de alta magnitude [5].

Os resultados ou valores calculados indicam que os valores normalmente utilizados (por exemplo, o valor k = 22 pré configurado no Software Interprote) para o fator k no instante 16,66 ms (1 ciclo) da corrente de inrush representam uma condição bastante conservadora, onde os valores tendem a reproduzir a pior condição possível de religamento em todos os transformadores de distribuição, inclusive os transformadores de consumidores de média tensão atendidos pelo circuito em estudo. Observa-se também que os resultados calculados desta forma não podem ser considerados referências adequadas para o ajuste de proteção, pois em alguns valores obtidos (por exemplo, para

os alimentadores TSE-102, EMB-106), o valor da corrente de inrush é da ordem de dezenas de milhares de ampéres, certamente não há potência de curto-circuito para se alcançar esta condição.

Sendo assim, procurou-se estimar através da determinação da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores, qual seria o fator k calculado (nos instantes de análise, ou seja, 16,66 ms e 100 ms após o início da corrente de inrush) que aproximaria a corrente calculada aos valores realmente medidos. Os valores obtidos podem ser observados nas **tabelas 4.21** à **4.23** nas páginas 76 e 79 à seguir.

#### 4.3.2.1 Fator Multiplicativo k ajustado para o instante 16,66 ms (1° ciclo)

A **figura 4.3** ilustra, para o fator multiplicativo k calculado referente ao instante de 16,66 ms, os valores obtidos para os 241 (duzentos e quarenta e um) eventos de correntes de inrush em carga quente, além do valor médio obtido.

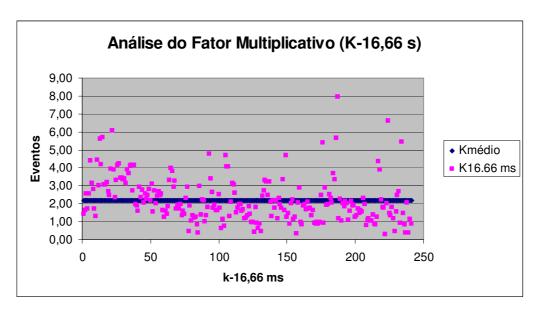


Figura 4.3: Estimativa do fator multiplicativo k referente ao instante 16,66 ms

Analisando este gráfico obtém-se o valor da média aritmética do fator k com o valor de 2,19.

Nesta dissertação, uma vez que no tocante ao fenômeno da corrente de inrush, onde este apresenta valores aleatórios em um determinado alimentador e sendo que em cada evento o seu valor pode variar, conforme visto no capítulo 2, por diversos fatores, optou-se por analisar o fator multiplicativo k nos seus instantes notáveis (1° e 6° ciclo) como uma variável de natureza probabilística.

Desta forma, a **figura 4.4** ilustra um histograma o qual mostra a distribuição dos valores do fator multiplicativo k no instante 16,6ms obtidos através das medições em função do número da freqüência em que os mesmos ocorreram.

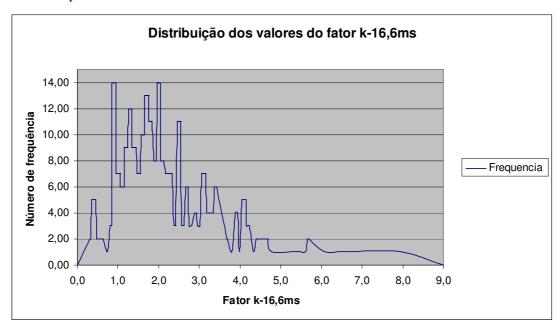


Figura 4.4: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-16,6ms (carga quente) em função de freqüências ocorridas

De acordo com a **figura 4.4** observa-se que a distribuição aparentemente não é normal, porém de qualquer forma para garantir a consistência dos cálculos deste trabalho, de acordo com a referência [56], para uma distribuição não normal, com a amostra suficientemente grande, resultará, do teorema do limite central, que, no caso de população infinita a distribuição amostral da média aritmética será aproximadamente normal, pois o seu valor resultará de uma soma de um número grande de variáveis aleatórias independentes. A **figura 4.5** ilustra as curvas distribuição normal e distribuição não normal conforme a teoria discutida neste parágrafo.

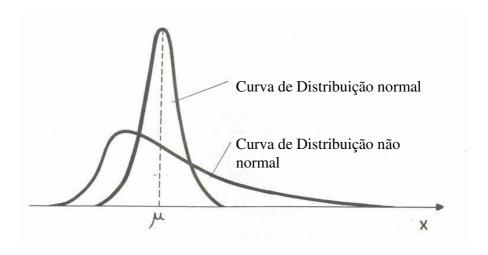


Figura 4.5: Curvas sobrepostas de Distribuição Normal e Distribuição não normal

Obs: X – Eixo da distribuição de valores de alguma amostra

μ - Média aritmética dos valores de alguma amostra

Desta forma, considerando que as amostras do fator k podem ser caracterizadas como uma distribuição normal, de acordo com a Função Densidade de Probabilidade [57], qualquer que for o número da amostra, a sua média sempre ficará próxima a uma determinada margem de valor.

# 4.3.2.2 Fator Multiplicativo k ajustado para o instante 16,66 ms através de Níveis de Confiança

Para obtenção dos valores dos fatores multiplicativos k conforme as propriedades da Distribuição Normal, será analisado através de Níveis de Confiança para Valores Críticos Inteiros [58], no qual de acordo com as **expressões 4.5** à **4.7** extraídas da referida teoria têm-se:

 $\begin{array}{lll} \mu \pm 1\sigma & \rightarrow & 68,27 \ \% \ de \ confiança & (expressão 4.5) \\ \mu \pm 2\sigma & \rightarrow & 95,45 \ \% \ de \ confiança & (expressão 4.6) \\ \mu \pm 3\sigma & \rightarrow & 99,73 \ \% \ de \ confiança & (expressão 4.7) \end{array}$ 

Onde:

**μ:** Média da amostra

**σ:** Desvio padrão da amostra

No caso deste trabalho, os valores dos fatores multiplicativos k serão calculados adotando-se 95,45% de nível de confiança, ou seja, o valor será a média aritmética mais duas vezes o desvio padrão da amostra [58]. **Na figura 4.6** está ilustrada a Distribuição Normal com o referido nível de confiança:

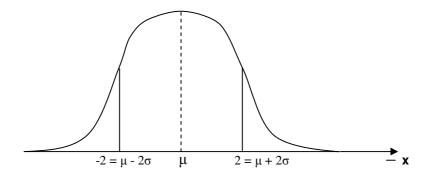


Figura 4.6: Curva e parâmetros da Distribuição Normal aproximada aplicada às amostras de corrente de carga quente em 16,6 ms

Considerando-se a teoria apresentada nos parágrafos anteriores às informações do fator multiplicativo k, somando-se todos os valores obtidos pelos 241 eventos referentes ao instante 16,66 ms, extraídas das **tabelas 4.1 á 4.20** e **figura 4.2**, obtém-se as informações à seguir:

 $\mu$ : 2,19 (média aritmética do fator  $K_{16.66 \text{ ms}}$ , obtida no item 4.3.2.1)

 $\sigma$ : 1,23 (desvio padrão do fator  $K_{16.66 \text{ ms}}$ )

**n:** 241 (número de eventos analisados em carga quente)

Desta forma, substituindo esses valores nas variáveis da expressão 4.6:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2,19 \pm 2.1,23$$

Tendo em vista que neste trabalho os resultados obtidos serão posteriormente sugeridos como novos parâmetros para cálculos das correntes de inrush, para fins práticos de utilização, será considerado sempre o intervalo positivo, ou seja:

$$2,19 + 2,46 = 4,65$$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado entre os 241 eventos foi **4,65**, sendo que o valor máximo alcançado entre os 241 eventos foi **7,95**.

#### 4.3.2.3 Fator Multiplicativo (K<sub>16.66ms</sub>) Ajustado em Função da Potência Instalada

A potência instalada do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, e sua respectiva corrente nominal é um fator que certamente deve influenciar a magnitude da corrente de inrush. Com base neste aspecto, a partir dos resultados expostos nas **tabelas 4.1** a **4.20**, na **tabela 4.21** são esboçados os valores probabilísticos, através do mesmo processo apresentado no **item 4.3.2.2**, onde o fator k é ajustado para o instante 16,66 ms (1° ciclo) da corrente de inrush em carga quente, referentes a algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

Tabela 4.21: Fator multiplicativo k (16,66 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms
0 - 500	5,63
500 - 1000	2,88
> 1000	1,76

Observa-se que, à luz dos resultados obtidos, que o fator k decresce à medida que se aumenta a corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador.

#### 4.3.2.4 Fator Multiplicativo k Ajustado para o Instante 100 ms (6 ciclos)

Analogamente ao **item 4.3.2.1**, para o fator multiplicativo k ajustado para o instante 100 ms (6° ciclo), têm-se, **na figura 4.7**, a distribuição de pontos obtidos para os 241 eventos analisados (e indicação do valor médio resultante) para a corrente de inrush em carga quente:

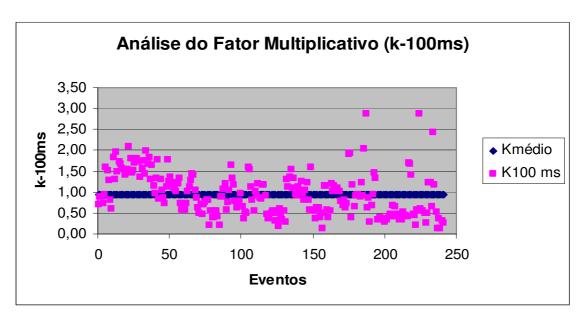


Figura 4.7: Análise do fator multiplicativo k referente ao instante 100 ms (6 ciclos)

Analisando este gráfico obtém-se o valor da média aritmética do fator k como sendo uma variável aritmética com o valor de 0,94, porém, analogamente ao procedimento para obtenção do fator k em 16,66 ms, o mesmo é analisado como uma variável probabilística, ou seja, caracterizada como Distribuição Normal [56] e sujeito a uma média e desvio padrão característicos conforme visto no **item 4.3.2.2.** 

Desta forma, a **figura 4.8** ilustra um histograma o qual mostra a distribuição dos valores do fator multiplicativo k no instante 100ms, obtidos através das medições em função da freqüência em que os mesmos ocorreram.

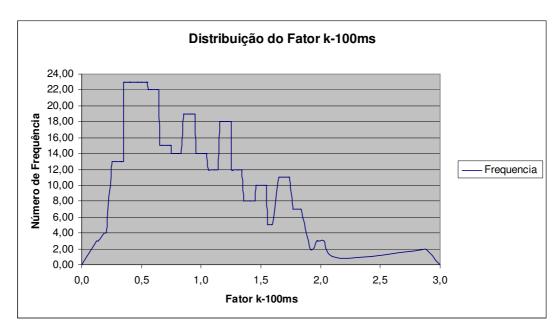


Figura 4.8: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-16,6ms (carga quente) em função de freqüências ocorridas

De acordo com a **figura 4.8** observa-se que as amostras para o instante 100 ms, a distribuição aparentemente não é normal, porém igualmente observado na análise para o instante 16,6 ms, para garantia dos cálculos, de acordo com a referência [56], mesmo para uma distribuição não normal com a amostra suficientemente grande, resultará, do teorema do limite central, que, no caso de população infinita a distribuição amostral da média aritmética será aproximadamente normal, pois o seu valor resultará de uma soma de um número grande de variáveis aleatórias independentes.

# 4.3.2.5 Fator Multiplicativo k Ajustado para o Instante 100 ms Através de Intervalos de Confiança

Similarmente ao item **4.3.2.2**, a média do fator multiplicativo k no instante 100 ms deve ser obtida de acordo com um nível de confiança utilizando a **expressão 4.6** e, somando-se todos os valores obtidos pelos 241 eventos referentes ao instante 100 ms, extraídas das **tabelas 4.1** á **4.20** e **figura 4.7**, obtém-se as informações abaixo:

 $\mu$ : 0,94 (média aritmética do fator  $K_{100 \text{ ms}}$  obtida no item 4.3.2.2)

 $\sigma$ : 0,51 (desvio padrão do fator  $K_{100 \text{ ms}}$ )

**n:** 241 (número de eventos analisados)

Desta forma, substituindo esses valores na **expressão 4.6** com 95,45% de confiança, obtém-se o seguinte resultado:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 0.94 \pm 2.0.51$$

Tendo em vista que os resultados obtidos serão posteriormente sugeridos como novos parâmetros para cálculos das correntes de inrush, para fins práticos de utilização, será considerado sempre o intervalo positivo, ou seja:

$$0,94 \pm 1,02 = 1,96$$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado entre os 241 eventos foi **1,96**, sendo que o valor máximo alcançado entre os 241 eventos foi **2,88**.

#### 4.3.2.6 Fator Multiplicativo $(K_{100 \, ms})$ ajustado em Função da Potência Instalada

A partir dos resultados expostos nas **tabelas 4.1** á **4.20**, na **tabela 4.22** são esboçados os valores probabilísticos em intervalos de confiança, através do mesmo processo apresentado no **item 4.3.2.2**, do fator k ajustado para o instante 100 ms (6 ciclos) da corrente de inrush, referentes a algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

Tabela 4.22: Fator multiplicativo k (100 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 - 500	2,33
500 - 1000	1,28
> 1000	0,67

De acordo com os resultados alcançados ou obtidos, pode-se concluir que os fatores multiplicativos normalmente considerados pelos modelos tradicionais de cálculos elétricos, majoram ou sobredimensionam os valores e cálculos da corrente de inrush, onde em alguns casos

se obtêm os resultados na ordem de uma dezena de quilo-ampéres, sendo que muitas vezes não há potência de curto-circuito o suficiente para se alcançar esses valores.

Obteve-se uma variação bem relevante ou significativa do fator k ajustado, em relação aos instantes de 16,66 ms (na faixa em torno de 0,31 à 7,95, além de um valor médio aritmético próximo a 2,19) e 100 ms (na faixa em torno de 0,12 à 2,88, além de um valor médio aritmético próximo a 0,94), o qual demonstrou uma certa dependência da potência instalada total e da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, uma vez que o fator k ajustado é decrescente com estes parâmetros.

Sugere-se em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, os seguintes valores de referência para o fator multiplicativo k:

Tabela 4.23: Valores sugeridos para os fatores multiplicativos da corrente nominal visando à determinação das correntes de inrush em carga quente

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 – 500	6	2,5
500 – 1000	3	1,5
> 1000	2	1

# **CAPÍTULO 5**

### ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH EM CARGA FRIA

#### 5.1 Considerações Gerais

Similarmente ao **Capítulo 4**, o principal objetivo deste capítulo consiste em fazer uma análise do modo tradicional de estimativa da corrente de inrush, porém em carga fria. A metodologia e as comparações com o método tradicional de tais correntes são os mesmos adotados nas análises do Capítulo 4, onde foram baseadas na utilização de fatores multiplicativos aplicados à corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador de média tensão. Trabalhouse com informações referentes ao sistema elétrico distribuidor da AES ELETROPAULO

### 5.2 Determinação das correntes de inrush em Carga fria

Neste tópico serão analisadas as correntes de inrush em carga fria, a qual a sua definição foi descrita no item **3.6**.

Para a obtenção dos resultados deste tópico foram estudados 38 (trinta e oito) alimentadores de distribuição totalizando uma amostra de 50 (cinqüenta) medições de correntes de inrush em cargas frias onde, similarmente à análise em carga quente, não foram consideradas as correntes de inrush oriundas de religamentos de defeitos permanentes registrados pelo medidor Power 3720, pois nas medições desses tipos de ocorrências, há uma grande probabilidade de existir corrente de defeito somada com corrente de inrush, assim comprometendo o objetivo do estudo.

Para compatibilizar os dados comparados com respeito à topologia e carregamento dos alimentadores considerados, o procedimento também foi similar ao de carga quente (**item 4.3**), ou seja, inicialmente verificou-se o banco de dados de ocorrência da AES ELETROPAULO com o

intuito de se certificar que não houveram trechos isolados ou queima de fusíveis nas ocorrências analisadas.

A metodologia adotada consistiu nos seguintes passos:

- a) Escolha dos 38 alimentadores com registro de medição a partir do medidor Power 3720, que seguiu um critério de levantamento do maior número de ocorrências capturadas considerando-se os circuitos das subestações que contém este medidor;
- **b**) Identificação nos arquivos de saída do medidor Power 3720 dos eventos que tiveram longo tempo de interrupção no fornecimento de energia, com o religamento bem sucedido e que compreendessem toda a carga do alimentador;
- c) Cálculo das correntes de Inrush através do Software Interprote;
- **d)** Através dos resultados de corrente de inrush obtidos por meio do Software Interprote, foram determinadas as respectivas correntes nominais do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador em questão;
- e) Através da obtenção da corrente nominal e da corrente de inrush observada no medidor Power 3720, estimaram-se os fatores multiplicativos ajustados como variáveis probabilísticas que conduzem o cálculo da corrente de inrush aos valores efetivamente medidos.

### 5.2.1 Apresentação dos Resultados das Correntes de Inrush em Cargas Frias

Neste item são apresentados os resultados obtidos através do procedimento descrito no item anterior.

#### 5.2.1.1 Subestação Bartira (BAR)

Foram estudados 10 (dez) alimentadores da <u>Subestação Bartira</u> conforme mostra a **tabela 5.1**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.1: Resultados obtidos para a SE Bartira

		I inrusl Power		I inrush Cálculo F				
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
BAR-102	04/02/05	619	537	9401	5306	442,2	1,4	1,2
BAR-103	20/08/04	847	593	16694	9446	787,2	1,1	0,8
BAR-104	04/02/05	831	473	7359	4165	347,1	2,4	1,4
BAR-105	20/08/04	625	305	3610	2037	169,8	3,7	1,8
BAR-107	05/11/04	950	586	5703	3231	269,3	3,5	2,2
BAR-109	13/04/04	1305	855	7680	4349	362,4	3,6	2,4
BAR-109	20/08/04	635	607	7680	4349	362,4	1,8	1,7
BAR-110	20/06/04	1274	552	7383	4161	346,8	3,7	1,6
BAR-110	04/02/05	776	446	7383	4161	346,8	2,2	1,3
BAR-113	20/08/04	1092	595	9723	5482	456,8	2,4	1,3
BAR-113	10/02/05	983	577	9723	5482	456,8	2,2	1,3
BAR-114	10/02/05	1696	883	11957	6750	562,5	3,0	1,6
BAR-115	20/08/04	967	697	10559	5981	498,4	1,9	1,4

#### 5.1.1.2 Subestação Barra Funda (BFU)

Foram estudados 3 (três) alimentadores da <u>Subestação Barra Funda</u> conforme mostra a **tabela 5.2**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.2: Resultados obtidos para a SE Barra Funda

		I inrusl Power	` '		sh (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
BFU-102	22/05/04	1147	359	8817	4984	415,3	2,8	0,9
BFU-106	16/09/04	992	455	17616	9947	828,9	1,2	0,5
BFU-106	07/11/04	1500	732	17616	9947	828,9	1,8	0,9
BFU-109	31/05/04	1318	596	9619	5443	453,6	2,9	1,3
BFU-109	08/06/04	1084	399	9619	5443	453,6	2,4	0,9

#### 5.1.1.3 Subestação Campestre (CPE)

Foram estudados 4 (quatro) alimentadores da <u>Subestação Campestre</u> conforme mostra a **tabela 5.3**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.3: Resultados obtidos para a SE Campestre

		I inrusl Power	` ′		sh (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
CPE-102	09/09/04	351	189	3027	1709	142,4	2,5	1,3
CPE-108	27/03/04	915	425	11179	6310	525,8	1,7	0,8
CPE-108	09/09/04	801	417	11179	6310	525,8	1,5	0,8
CPE-111	28/08/04	1028	586	8104	4600	383,3	2,7	1,5
CPE-114	09/09/04	871	414	7553	4269	355,8	2,4	1,2

#### 5.1.1.4 Subestação Carrão (CRA)

Foram estudados 2 (dois) alimentadores da <u>Subestação Carrão</u> conforme mostra a **tabela 5.4**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.4: Resultados obtidos para a SE Carrão

		I inrusl Power		I inrus Cálculo	sh (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
CRA-108	17/08/04	1474	791	16164	9121	760,1	1,9	1,0
CRA-111	01/08/04	996	487	9176	5175	431,3	2,3	1,1

#### 5.1.1.5 Subestação Diadema (DIA)

Foram estudados 3 (três) alimentadores da <u>Subestação Diadema</u> conforme mostra a **tabela 5.5**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.5: Resultados obtidos para a SE Diadema

		I inrusł		I inrush (A) –				
		Power	3720	Cálculo	Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	$I_{100ms}$	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100\;ms}$
DIA-102	15/02/04	1237	633	8482	4805	400,4	3,1	1,6
DIA-111	17/02/04	956	316	19138	10798	899,8	1,1	0,4
DIA-114	28/07/04	1056	535	27314	15451	1287,6	0,8	0,4

#### 5.1.1.6 Subestação Embu (EMB)

Foi estudado 1 (um) alimentador da <u>Subestação Embu</u> conforme mostra a **tabela 5.6**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.6: Resultados obtidos da SE Embu

		I inrush Power	` /		h (A) – Elétrico				
Circuito	Data	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>	
EMB-108	17/08/04	1536	981	11539	5618	468,2	3,3	2,1	

#### 5.1.1.7 Subestação Itaquera (ITR)

Foi estudado 1 (um) alimentador da <u>Subestação Itaquera</u> conforme mostra a **tabela 5.7**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico:

Tabela 5.7: Resultados obtidos para a SE Itaquera

				I inrush (A) – Cálculo Elétrico				
Circuit	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
ITR-102	2 18/09/04	914	589	11573	6537	544,8	1,7	1,1

#### 5.1.1.8 Subestação Jordanésia (JOR)

Foram estudados 2 (dois) alimentadores da <u>Subestação Jordanésia</u> conforme a **tabela 5.8**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.8: Resultados obtidos da SE Jordanésia

				I inrus Cálculo				_
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
JOR-102	17/10/04	1483	744	21574	12165	1013,8	1,5	0,7
JOR-106	16/09/03	1061	289	21839	12343	1028,6	1,0	0,3
JOR-106	27/12/03	754	273	21839	12343	1028,6	0,7	0,3

#### 5.1.1.9 Subestação Lubeca (LUB)

Foram estudados 2 (dois) alimentadores da <u>Subestação Lubeca</u> conforme mostra a **tabela 5.9**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.9: Resultados obtidos para a SE Lubeca

		I inrusl Power	` '		sh (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
LUB-106	23/09/04	1708	726	6171	3490	290,8	5,9	2,5
LUB-108	25/07/04	1223	700	11205	6347	528,9	2,3	1,3

#### 5.1.1.10 Subestação Monções (MOC)

Foram estudados 2 (dois) alimentadores da <u>Subestação Monções</u> conforme mostra a **tabela 5.10**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.10: Resultados obtidos para a SE Monções

		I inrusl Power		I inrus Cálculo	h (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
MOC-108	18/08/04	956	550	21831	12326	1027,2	0,9	0,5
MOC-114	06/05/04	985	736	3503	1977	164,8	6,0	4,5

#### 5.1.1.11 Subestação Piraporinha (PIP)

Foi estudado 1 (um) alimentador da <u>Subestação Piraporinha</u> conforme mostra a **tabela 5.11**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.11: Resultados obtidos para a SE Piraporinha

		I inrush Power	I inrush (A) – I inr Power 3720 Cálcu					
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I 100 ms	I 16.66 ms	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
PIP-104	08/07/04	1054	680	22321	12596	1049,7	1,0	0,6

#### 5.1.1.12 Subestação Parelheiros (PRE)

Foram estudados 4 (quatro) alimentadores da <u>Subestação Parelheiros</u> conforme mostra a **tabela 5.12**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.12: Resultados obtidos para a SE Parelheiros

		I inrusl Power			sh (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
PRE-102	25/01/05	775	573	11101	6292	524,3	1,5	1,1
PRE-104	09/11/04	800	565	11893	6730	560,8	1,4	1,0
PRE-106	22/05/04	734	583	12734	7203	600,3	1,2	1,0
PRE-107	30/05/04	835	222	10284	5811	484,3	1,7	0,5
PRE-107	26/06/04	855	215	10284	5811	484,3	1,8	0,4
PRE-107	14/09/04	734	265	10284	5811	484,3	1,5	0,5

#### 5.1.1.13 Subestação Rio Grande (RGR)

Foi estudado 1 (um) alimentador da <u>Subestação Rio Grande</u> conforme mostra a **tabela 5.13**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.13: Resultados obtidos para a SE Rio Grande

		I inrush Power	` ′	I inrush (A) – Cálculo Elétrico		]		
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	K <sub>100 ms</sub>
RGR-103	25/02/05	1240	628	15648	8839	736,6	1,7	0,9

#### 5.1.1.14 Subestação Taboão da Serra (TSE)

Foram estudados 2 (dois) alimentadores da <u>Subestação Taboão da Serra</u> conforme mostra a **tabela 5.14**, a qual apresenta os resultados obtidos de medição e do cálculo elétrico através do método tradicional (Programa Interprote):

Tabela 5.14: Resultados obtidos para a SE Taboão da Serra

		I inrusl Power			h (A) – Elétrico			
Circuito	Data	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	I <sub>16.66 ms</sub>	I <sub>100 ms</sub>	Inom	K <sub>16.66 ms</sub>	$K_{100 \text{ ms}}$
TSE-104	08/07/04	1409	788	9000	4320	360	3,9	2,2
TSE-104	30/09/04	1303	741	9000	4320	360	3,6	2,1
TSE-104	17/10/04	1325	781	9000	4320	360	3,7	2,2
TSE-104	22/11/04	1175	717	9000	4320	360	3,3	2,0
TSE-109	18/09/04	1043	474	9730	5491	457,6	2,3	1,0

#### 5.2.2 Análise dos Resultados

O procedimento da análise dos resultados para a obtenção dos fatores multiplicativos k para as correntes de inrush em carga fria é o mesmo adotado para a obtenção dos fatores em carga quente, bem como as observações sobre o uso do Programa Interprote, e na comparação dos valores medidos com a metodologia atualmente utilizada pelas concessionárias brasileiras (fatores multiplicativos pré-estabelecidos, ou seja, valores fixos não configuráveis em 22 e 12, respectivamente aos instantes de 16,66 (1 ciclo) e 100 ms (6 ciclos), aplicados à corrente nominal referente ao conjunto de transformadores atendidos pelo circuito em estudo).

Sendo assim, igualmente ao **item 4.3.2**, procurou-se estimar através da determinação da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores, qual seria o fator k calculado (nos instantes de análise, ou seja, 16,66 ms e 100 ms após o início da corrente de inrush) que aproximaria a corrente calculada aos valores realmente medidos. Os valores obtidos podem ser observados nas tabelas **5.1** à **5.14**.

#### 5.2.2.1 Fator Multiplicativo k Ajustado para o Instante 16,66 ms (1 ciclo)

A **figura 5.1** esboça, para o fator multiplicativo k calculado referente ao instante de 16,66 ms, os valores obtidos para os 50 (cinqüenta) eventos em carga fria, além do valor médio obtido.

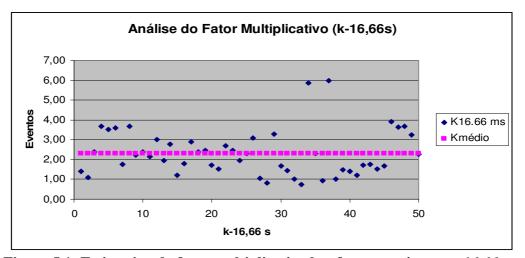


Figura 5.1: Estimativa do fator multiplicativo k referente ao instante 16,66 ms

Analisando este gráfico obtém-se para as correntes de inrush em carga fria, o valor da média aritmética do fator k com o valor de 2,32, porém, analogamente ao procedimento da análise dos fatores multiplicativos k para correntes de inrush em carga quente, deve ser analisado como sendo uma variável probabilística, onde é caracterizada como distribuição normal e sujeito a uma média e desvio padrão característico, conforme visto no **item 4.3.2.1**, onde desta forma se obtém o resultados de acordo com Níveis de Confiança [56] para a média aritmética dos 50 eventos.

Desta forma, a **figura 5.2** ilustra um histograma o qual mostra a distribuição dos valores do fator multiplicativo k no instante 16,6 ms obtidos através das medições em função do número de freqüência em que os mesmos ocorreram.

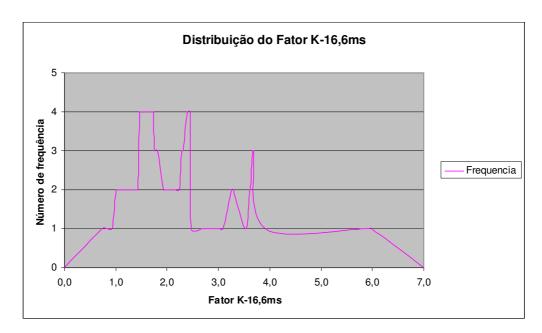


Figura 5.2: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-16,6ms (carga fria) em função de freqüências ocorridas

De acordo com a **figura 5.2** observa-se que as amostras para o instante 16,6 ms, a distribuição aparentemente não é normal, porém igualmente observado na análise para o instante 16,6 ms em carga quente, para garantia dos cálculos, de acordo com a referência [56], mesmo para uma distribuição não normal com a amostra suficientemente grande, resultará, do teorema do limite central, que, no caso de população infinita a distribuição amostral da média aritmética será aproximadamente normal, pois o seu valor resultará de uma soma de um número grande de variáveis aleatórias independentes.

# 5.2.2.2 Fator Multiplicativo k ajustado para o Instante 16,66 ms através de Níveis de Confiança

Analogamente ao **item 4.3.2.2**, deve-se analisar os resultados de acordo com um nível de confiança em torno da média do fator multiplicativo k de forma tal que este contenha o valor dentro de um nível de confiança [58], desta forma, somando-se todos os valores obtidos pelos 50 eventos referentes ao instante 16,66 ms, extraídas das **tabelas 5.1 á 5.14** e **figura 5.1**, obtemos as informações à seguir:

 $\mu$ : 2,32 (média aritmética do fator  $K_{16.66 \text{ ms}}$  obtida no item 5.2.2.1)

σ: 1,15 (desvio padrão do fator  $K_{16.66 \text{ ms}}$ )

**n:** 50 (número de eventos analisados)

Desta forma, substituindo esses valores nas variáveis da expressão 4.6:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2.32 \pm 2.1.15$$

Tendo em vista que neste trabalho os resultados obtidos serão posteriormente sugeridos como novos parâmetros para cálculos das correntes de inrush, para fins práticos de utilização, será considerado sempre o intervalo positivo, ou seja:

$$2,32 + 2,30 = 4,62$$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado entre os 50 eventos foi **4,62**, sendo que o valor máximo alcançado entre os 50 eventos foi **5,98**.

#### 5.2.2.3 Fator Multiplicativo (K<sub>16.66 ms</sub>) ajustado em Função da Potência Instalada

Tendo em vista que a potência instalada do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador é um fator bastante influente na magnitude da corrente de inrush. A partir dos resultados expostos nas **tabelas 5.1** à **5.14**, na **tabela 5.15** são esboçados os valores probabilísticos

em níveis de confiança, através do mesmo processo apresentado no **item 4.3.2.2**, onde o fator k é ajustado para o instante 16,66 ms (1° ciclo) da corrente de inrush em carga fria, referentes as faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

Tabela 5.15: Fator multiplicativo k (16,66 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms
0 - 500	5,08
500 - 1000	2,70
> 1000 *	1,51

**Nota** (\*): Na faixa de corrente ilustrada como (> 1000 A), na realidade analisaram-se 5 alimentadores (total de 6 eventos) em que as correntes nominais resultantes são da ordem de 1050 A.

Igualmente às correntes de inrush em carga quente, para carga fria pode-se afirmar que embora de maneira não totalmente regular, possivelmente, pelo motivo de uma quantidade de eventos não muito grande para algumas faixas, nota-se que o fator k decresce à medida que se aumenta a corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador.

#### 5.2.2.4 Fator Multiplicativo k Ajustado para o Instante 100 ms (6 ciclos)

Analogamente ao **item 4.3.2.1**, para o fator multiplicativo k ajustado para o instante 100 ms (6 ciclos), têm-se, **na figura 5.3**, a distribuição de pontos obtidos para os 50 eventos analisados das correntes de inrush em carga fria (e indicação do valor médio resultante):

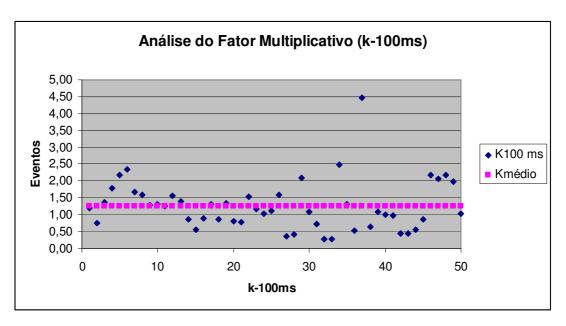


Figura 5.3: Análise do fator multiplicativo k referente ao instante 100 ms (6 ciclos)

Analisando este gráfico obtém-se o valor da média aritmética do fator k como sendo uma variável aritmética com o valor de 1,26, porém, analogamente ao procedimento para obtenção do fator k em 16,66 ms, o mesmo deve ser calculado como sendo uma variável probabilística, ou seja, caracterizada como Distribuição Normal [57] e sujeito a uma média e desvio padrão característicos conforme visto no **item 4.3.2.2.** 

Desta forma, a **figura 5.4** ilustra um histograma o qual mostra a distribuição dos valores do fator multiplicativo k no instante 100ms obtidos através das medições em função do número da frequência em que os mesmos ocorreram.

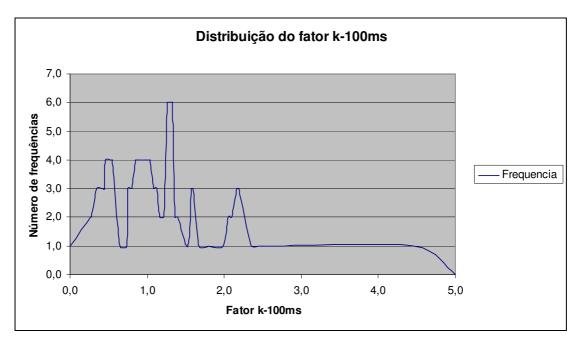


Figura 5.4: Histograma da distribuição dos valores do fator multiplicativo k-100ms (carga fria) em função de freqüências ocorridas

De acordo com a **figura 5.4** observa-se que as amostras para o instante 100 ms, a distribuição aparentemente não é normal, porém igualmente observado na análise para o instante 16,6 ms, para garantia dos cálculos, de acordo com a referência [56], mesmo para uma distribuição não normal com a amostra suficientemente grande, resultará, do teorema do limite central, que, no caso de população infinita a distribuição amostral da média aritmética será aproximadamente normal, pois o seu valor resultará de uma soma de um número grande de variáveis aleatórias independentes.

# 5.2.2.5 Fator Multiplicativo k ajustado para o instante 100 ms através de Intervalos de Confiança

Analogamente ao **item 4.3.2.2**, deve-se analisar os resultados de acordo com um nível de confiança em torno da média do fator multiplicativo k de forma tal que este contenha o valor dentro de um nível de confiança [58], desta forma, somando-se todos os valores obtidos pelos 50 eventos referentes ao instante 100 ms, extraídas das **tabelas 5.1 á 5.14** e **figura 5.3**, obtemos as informações à seguir:

 $\mu$ : 1,26 (média aritmética do fator  $K_{100 \text{ ms}}$  obtida no item 4.4.2.4)

 $\sigma$ : 0,74 (desvio padrão do fator  $K_{100 \text{ ms}}$ )

**n:** 50 (número de eventos analisados)

Desta forma, substituindo esses valores nas variáveis da expressão 4.6:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 1,26 \pm 2.0,74$$

Tendo em vista que os resultados obtidos serão posteriormente sugeridos como novos parâmetros para cálculos das correntes de inrush, para fins práticos será considerado sempre o intervalo positivo, ou seja:

$$1,26 + 1,48 = 4,74$$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado entre os 50 eventos foi **2,74**, sendo que o valor máximo alcançado entre os 50 eventos foi **4,47**.

#### 5.2.2.6 Fator Multiplicativo $(K_{100 \text{ ms}})$ ajustado em Função da Potência Instalada

A partir dos resultados expostos nas **tabelas 5.1** á **5.14**, na **tabela 5.16** são esboçados os valores probabilísticos em intervalos de confiança, através do mesmo processo apresentado no **item 4.3.2.2**, do fator k ajustado para o instante 100 ms (1 ciclo) da corrente de inrush em carga fria, referentes a algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

Tabela 5.16: Fator multiplicativo k (100 ms) em função das faixas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelos alimentadores

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 - 500	3,13
500 - 1000	1,54
> 1000	0,48

#### Nota (\*): Comentário análogo à análise do fator multiplicativo k para o instante 16,66 ms.

Igualmente aos comentários dos itens anteriores, pode-se concluir que os fatores multiplicativos normalmente considerados (e utilizados pelo Programa Interprote), majoram ou sobredimensionam os valores e cálculos da corrente de inrush na ordem de uma dezena de quilo-ampéres, sendo que muitas vezes não há potência de curto-circuito o suficiente para se alcançar esses valores.

Para correntes de inrush em carga fria obteve-se uma variação significativa do fator k ajustado, em relação aos instantes de 16,66 ms (na faixa em torno de 0,73 a 6, além de um valor médio aritmético próximo a 2.32) e 100 ms (na faixa em torno de 0,27 a 4,47, além de um valor médio aritmético próximo a 1,26), o qual demonstrou uma certa dependência da potência instalada total e da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, uma vez que o fator k ajustado é decrescente com estes parâmetros.

Sugere-se como função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, os seguintes valores de referência para o fator multiplicativo k, ilustrados na **tabela 5.17**:

Tabela 5.17: Valores sugeridos para os fatores multiplicativos da corrente nominal visando à determinação das correntes de inrush em carga fria

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,66 ms	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 – 500	6,0	3,5
500 - 1000	3,0	2,0
> 1000	2,0	0,5

Comparando os valores das **tabelas 4.23** e **5.17**, as quais estão esboçadas os resultados finais das análises dos fatores multiplicativos k para as correntes de inrush em carga quente e carga fria respectivamente, embora o número de eventos analisados não seja igual entre os casos, observa-se

de forma regular, que para a maioria das faixas de corrente nominal dos alimentadores as correntes de inrush em carga fria tendem a ser maiores do que em carga quente.

A única faixa de corrente nominal em que as correntes de carga quente apresentaram fatores multiplicativos maiores ou iguais do que em carga fria é para os alimentadores com corrente nominal acima de 1000 A (mil Ampéres), isto pode ser devido ao número analisado para ambos os casos ser relativamente baixo (seis eventos).

# **CAPÍTULO 6**

# ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH COM AS POTÊNCIAS DE CURTO-CIRCUITO

Tendo-se em vista que a potência de curto-circuito também se constitui em um dos parâmetros que contribuem para a caracterização e magnitude das correntes de inrush em um determinado alimentador [5], neste trabalho analisou-se a relação deste parâmetro com as amostras (carga quente e carga fria) das correntes de inrush estudadas, com o intuito de se observar a interação entre estes dois fenômenos.

Na **figura 6.1** estão ilustradas as subestações analisadas neste trabalho com suas respectivas potências de curto-circuito (Qcc trifásico) nas barras de suprimentos dos alimentadores. Observase que, da esquerda para a direita, estão posicionadas gradativamente (em ordem decrescente) as subestações com os maiores níveis de curto-circuito:

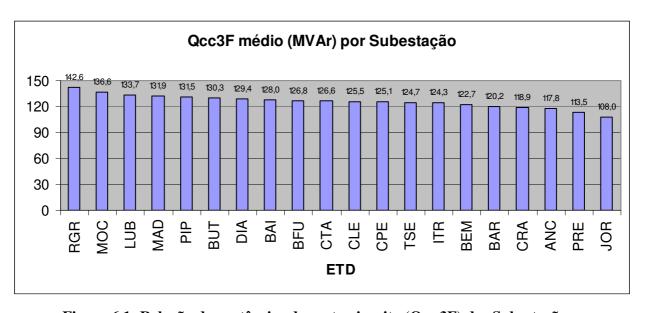


Figura 6.1: Relação das potências de curto-circuito (Qcc 3F) das Subestações.

Conforme a metodologia de cálculo apresentada no **item 4.3.2.1**, analisaram-se as 241 (duzentas e quarenta e uma) amostras de correntes de inrush em carga fria e das 50 (cinqüenta) amostras das correntes de inrush em carga fria, e determinaram-se os intervalos de confiança dos fatores multiplicativos k médio por subestação nos instantes de 16,66ms (1 ciclo) e 100ms (6 ciclos).

Nas **tabelas 6.1 a 6.4** estão apresentadas, em ordem decrescente, as subestações e seus respectivos intervalos de confiança médios relativos aos fatores multiplicativos conforme citado no parágrafo anterior.

Tabela 6.1: Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instante 16,66 ms para as correntes de inrush em carga quente

Subestação	Intervalo (K-16,66ms)	Classificação (Qcc3F)
MAD	3,93	<b>4</b> º
ITR	3,23	14º
MOC	3,20	2 º
BAR	3,11	16º
BFU	2,44	9º
CRA	2,43	17º
BAI	2,38	8º
BEM	2,15	15º
RGR	2,14	1 º
ANC	1,77	18º
CTA	1,72	10º
PRE	1,70	19º
TSE	1,66	13º
BUT	1,66	6º
CPE	1,56	12º
CLE	1,55	11º
LUB	1,50	3 º
PIP	1,49	5º
JOR	1,32	20º
DIA	0,93	7º

**Observação:** Em relação à tabela 5.1, a nomenclatura das colunas indica os seguintes parâmetros.

<sup>-</sup> **Subestação:** Sigla da subestação analisada;

- Intervalo (K-16,66ms): Intervalo de confiança médio do fator multiplicativo k para o instante de 16,66 ms;
- Classificação (Qcc3F): Classificação da subestação por ordem de magnitude da potência de curto-circuito trifásica na barra de suprimento dos alimentados.

Tabela 6.2: Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instante 100 ms para as correntes de inrush em carga quente

ETD	Intervalo (K-100ms)	Classificação (Qcc3F)
MAD	1,93	4º
BAR	1,42	16º
MOC	1,18	2 º
BEM	1,08	15º
ITR	1,00	14º
BAI	0,95	8₀
BFU	0,95	9º
CRA	0,93	17º
LUB	0,89	3 º
CPE	0,78	12º
ANC	0,73	18º
CTA	0,73	10º
TSE	0,72	13º
RGR	0,67	1 º
BUT	0,63	6º
PIP	0,59	5º
PRE	0,56	19º
CLE	0,53	11º
JOR	0,47	20⁰
DIA	0,44	7º

Tabela 6.3: Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instante 16,66 ms para as correntes de inrush em carga fria

ETD	Intervalo (K-16,66ms)	Classificação (Qcc3F)
LUB	4,09	3 º
MOC	3,45	2 º
TSE	3,35	13º
BEM	3,28	15º
BAR	2,53	16º
BFU	2,21	9º
CPE	2,17	12º
CRA	2,12	17º
RGR	1,68	1 º
ITR	1,67	14º
DIA	1,66	7º
PRE	1,52	19º
JOR	1,08	20º
PIP	1,00	5º

Tabela 6.4: Relação das subestações com os intervalos de confiança médio do fator k no instante 100 ms para as correntes de inrush em carga fria

ETD	Intervalo (K-100ms)	Classificação (Qcc3F)
MOC	2,5	2 º
EMB	2,09	15º
LUB	1,91	3 º
TSE	1,89	13º
BAR	1,52	16º
CPE	1,12	12º
CRA	1,08	17⁰
ITR	1,08	14º
BFU	0,9	9º
RGR	0,85	1 º
DIA	0,78	7⁰
PRE	0,75	19º
PIP	0,64	5º
JOR	0,43	20⁰

De acordo com as informações das tabelas **6.1** à **6.4**, tanto para as correntes de inrush oriundas em condição de carga fria ou de carga quente, nos instantes 16,66 e 100 ms, observa-se que as diferenças de magnitude das potências de curto-circuito nas barras de suprimento dos alimentadores analisados (conforme **figura 6.1**) não influenciaram nos valores (em magnitude) das correntes de inrush.

A classificação das subestações (barra de suprimento dos alimentadores) por suas respectivas potências de curto-circuito não foi similar à classificação dos valores do fator multiplicativo k por subestação em nenhuma das tabelas apresentadas neste capítulo.

Desta forma, aos níveis estudados não se detectou uma correlação efetiva da potência de curtocircuito das subestações com as respectivas correntes de inrush medidas. O universo do sistema elétrico da AES-Eletropaulo (o qual foram extraídas todas as amostras de medições para essa dissertação) é muito similar em relação às subestações, no que diz respeito às potências de curtocircuito nas barras de suprimento, bem como as características dos alimentadores (distâncias relativamente curtas e atendem cargas elevadas e concentradas).

É muito provável que a potência de curto-circuito influencia na caracterização dos valores das correntes de inrush tratando-se nos pontos de inserção de cada um dos transformadores ao longo dos alimentadores analisados nesta dissertação.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho contemplou a avaliação dos valores alcançados (magnitude) pelas correntes de inrush nas saídas dos alimentadores primários de distribuição da AES-ELETROPAULO, onde foram analisadas 241 (duzentas e quarenta e uma) amostras na condição de carga quente extraídas de 104 (cento e quatro) alimentadores, e 50 (cinqüenta) amostras na condição de carga fria extraídas de 38 (trinta e oito) alimentadores, nos instantes de 16,66 ms e 100 ms.

O sistema de proteção não deve atuar na ocorrência de correntes de inrush (ou mais precisamente, somente se este parâmetro estiver vinculado a uma falta permanente), que decorrem de transitórios eletromagnéticos em transformadores nas ações de religamento.

Conforme visto nesta dissertação o cálculo preciso da corrente de inrush é sobremodo complexo exigindo, ainda, o conhecimento do ciclo de histerese do material magnético do núcleo de cada transformador. Desta forma, os métodos utilizados consideram algumas simplificações que permitem estimar a corrente de inrush como função de fatores multiplicativos aplicados sobre a corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo circuito.

Ainda neste contexto, verificou-se que as técnicas mais modernas atualmente utilizadas buscam um tratamento da corrente de inrush calculado não na avaliação de sua magnitude, mas de suas características qualitativas.

As análises descritas nesta dissertação referente à corrente de inrush fundamentaram-se na comparação dos dados provindos de medição com os resultados de cálculo segundo o modelo tradicional (aplicação de fatores multiplicativos), onde se conclui que o modelo tradicional apresenta uma clara majoração a qual sobredimensionam as correntes resultantes. Desta forma, este trabalho viabilizou a sugestão de valores (ou faixa de valores) mais adequados e que tendem a garantir uma aproximação mais consistente com as medições.

Comparando os valores (magnitude) dos resultados finais das análises dos fatores multiplicativos k para as correntes de inrush nas condições de carga quente e carga fria, embora o número de eventos analisados seja distinto entre os casos, observou-se que em linhas gerais, as correntes de inrush na condição de carga fria tendem a ser maior ou igual do que em carga quente na maioria dos casos analisados.

Tanto para as correntes de inrush na condição de carga quente como na condição de carga fria, nos dois instantes analisados (16,66 ms e 100 ms), ambas demonstraram uma certa dependência da potência instalada total e da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, uma vez que o fator k ajustado é decrescente com estes parâmetros.

Concluiu-se também que tanto para as correntes de inrush na condição de carga fria quanto na condição de carga quente, nos instantes 16,66 e 100 ms, as diferenças de magnitude das potências de curto-circuito nas barras de suprimento dos alimentadores analisados não influenciaram nos valores (em magnitude) das correntes de inrush analisadas nesta dissertação.

#### 7.1 Propostas para Novas Pesquisas

Durante as análises desta dissertação foi observado que um tópico que merece ser pesquisado em um maior nível de detalhe, refere-se à estimativa das correntes de inrush em relação ao neutro dos alimentadores, pois é relevante ao sistema elétrico de distribuição de energia.

Da mesma forma em que foram analisadas as correntes de inrush nas fases dos alimentadores primários nesta dissertação, devem ser analisadas as correntes de inrush no neutro nas saídas dos alimentadores, tanto em carga quente como em carga fria.

Este tópico é relevante para os sistemas de distribuição em que utilizam transformadores monofásicos ao longo dos alimentadores, pois estes geram correntes de desequilíbrio e desta forma influenciam nos ajustes dos dispositivos de proteção. Os valores (em magnitude) das correntes de inrush do neutro tendem a intensificar conforme o aumento da corrente de desequilíbrio no neutro.

Um outro tópico que também poderia ser estudado com maiores detalhes é a influência das potências de curto-circuito em relação às magnitudes das correntes de inrush em variadas configurações de sistemas de distribuição de energia elétrica, como por exemplo, em alimentadores longos supridos por subestações com baixa potência de curto-circuito.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Maezono, P. K. Análise de perturbações parte 1 Conceitos e conhecimentos básicos. Apostila técnica Schweitzer Engineering Laboratories, Brasil Ltda. 2001.
- 2- Ayrosa, Cláudio Marques da S. Norma Técnica da Distribuição. Proteção de Redes de Distribuição. CPFL Energia, Campinas, 2003.
- **3-** Giguer, Sergio **Proteção de Sistemas de Distribuição**. Porto Alegre, Sagra Livraria Editora, 1988.
- 4- Antunes, A. U.; Arango, T. P. L. Avaliação de Desempenho e Possíveis Ajustes do Sistema de Proteção para Sistema Desequilibrado com Neutro Multi-Aterrado Análise de Eventos e Ajustes nos Modelos de Cálculo. Documento técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERQ-USP / AES ELETROPAULO, Fevereiro de 2006.
- 5- Furh, R. E. Power quality and protective device coordination: Problems & Solutions Part 2 High inrush currents for dry type transformers. P.E., January 1999.
- 6- Bronzeado, H.; Yacamini R. Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients. Department of Engineering, Aberdeen University, U.K., 1995.
- 7- Oliveira, C. C. B. Análise da Proteção de Sobrecorrente dos Circuitos Primários de Distribuição da Eletropaulo S.A. Documento técnico ENERQ-USP / AES ELETROPAULO, Junho de 2003.
- 8- França, J. A. **Proteção do Sistema de Distribuição**. Apostila Técnica F&F Consulting, Editoração ADC Arts, Design & Comunicação Visual Ltda. 2000.

- 9- Robba, E.J. Dispositivos de Proteção Critérios para o Desenvolvimento de Estudos de Proteção contra Sobrecorrentes. Documento técnico ENERQ-USP / AES ELETROPAULO, Janeiro de 2002.
- 10- Blume, L. F.; Camilli, G.; Farnham, S. B.; Peterson, H. A. Transformer magnetizing inrush currents and influence on system operation. AIEE Trans. Power App. Syst., vol. 63, pp. 366-375, Jan. 1944.
- 11- Specht, T. R. Transformer magnetizing inrush current. AIEE Trans. Power App. Syst., vol. 70, pp. 323-327, Jan. 1951.
- **12-** Yacamini, R.; Abu-Nasser, A. Numerical calculation of inrush current in single phase transformers. Proc Inst. Elec. Eng., vol 128, pt. B, no. 6, pp. 327-334, Nov. 1981.
- **13- ----. The calculation of inrush current in three phase transformers.** Proc Inst. Elec. Eng., vol 133, pt. B, no. 1, pp. 31-40, Jan. 1986.
- **14-** Spect, T. R. Transformer inrush and rectifier transient currents. IEEE Trans. Vol. PAS-88, n° 4. pp.269-276. April, 1969.
- 15- Yacamini, R.; Abu-Nasser, A. Transformer inrush current and their associated overvoltages in HVDC schemes. Proc. IEE vol. 133, Pt. C, no 6, pp.353-358. Sept, 1986.
- **16-** Morlet, J.; Grossmam, A; Kronland-Martinet, R. **Reading and Understanding Continuous Wavelet Transforms.** Berlin: Spring-Verlag, 1989. p.2-20
- 17- Sedighi, A. R., Haghifam, M. R. Detection of inrush current in distribution transformer using wavelet transform. Electrical Power and Energy Systems, pages 361-370, 25/11/2004.

- **18-** Takehara, J.; Kitagawa, M; Nakata, T.; Takahashi, N. **Finite element analysis of currents in three-phase transformers.** IEEE Transactions on Magnetics, vol. Mag-23, n° 5, September 1987.
- 19- Rajakovic, Nikola; Semlyem, Adam Investigation of the inrush phenomenon a quasistationary approach in the harmonic domain. Department of Electrical Engineering, University of Toronto. Ontario, Canada. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, n° 4, October 1989.
- **20-** Yacamini, R.; Bronzeado, R. **Transformer inrush calculations using a coupled electromagnetic model.** IEE Proc.-Sci. Meas Technol., Vol. 141, No. 6, November 1994.
- **21-** Rico, J. J., Acha, Enrique, Madrigal, M. **The study of inrush phenomenon using operational matrices**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, N° 2, april 2001.
- **22-** Digneffe, H. **Electronic control of power transformers.** Electron. Eng., vol. 55, pp. 53-60, Apr. 1983.
- 23- Ling, Paul C. Y.; Basak, Amitava Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer. Wolfson Center for Magnetics Technology. Cardiff, U.K. 1988 IEEE.
- 24- Lin, C. E.; Cheng, C. L.; Huang, C. L.; Yeh, J. C. Investigation of magnetizing inrush current in transformers Part II Harmonic Analysis. Institute of Aeronautics and Astronautics, Department of Electrical Engineering, Cheng Kjung University. Tainan, Taiwan, China. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no 1, January 1993.
- **25-** Asghar, M. Syed Jamil **Elimination of inrush current of transformers and distribution lines.** Department of eletrical Engineering, Aligarh Muslim University, Aligarh-202 2002, India.

- 26- Cui Y., Abdusalam, S.G. A Sequencial Phase Energization Method for Transformer Inrush Current Reduction, Part I: Simulation and Experimental Results. IEEE Trans. Power Delivery, vol 20, pp. 943-949, April 2005.
- 27- Xu, W. Cui Y., Abdusalam, S.G. A Sequencial Phase Energization Method for Transformer Inrush Current Reduction, Part II: Theoretical Analysis and Designs Guide. IEEE Trans. Power Delivery, vol 20, pp. 950-957, April 2005.
- **28-** Abdulsalam, Sami G.; Xu, Wilsun **Analytical study of transformer inrush current transients and its applications.** IPST'95. International Conference on Power Systems Transients. Alberta Energy Research Institute, University of Alberta, 2005.
- **29-** Sykes, J. A.; Morrison, I. F. **A proposal method of harmonic restraint differential protection of transformer by digital computer.** IEEE Transactions on Power App. Systems, Vol. PAS 91, n° 3, pp. 1266-1272. June 1972.
- **30-** Schweitzer, E. O.; Larson, R. R.; Flechsig, A. J. **An efficient inrush current detection algorithm for digital computer.** In Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Met. (Mexico), pt A77, p. 510, July 1977.
- 31- Ling, P. C. Y.; Basak, A. A new detection scheme for realization of inrush current in transformers. University of Wales, College of Cardiff, UK, 1988.
- 32- Youssef, Omar A.S. Applications of Fuzzy-Logic-Wavelet-Based techniques for transformers inrush currents identifications and power systems faults classification. Paper # 7803-8718-X. IEEE 2004.
- **33-** Youssef, Omar A.S. **Combined Fuzzy-Logic-Wavelet-Based faults classification technique for power system relaying.** Paper # TPWRD-00471-2002. IEEE Transactions on Power delivery, under print, Vol. 19, n°2, April 2004.

- **34-** Youssef, Omar A.S. **Applications of Fuzzy inference mechanisms to power system relaying.** Paper # TPWRD-00557-2003. Submitted for publication in the IEEE Transactions on Power delivery, Nov. 2003.
- **35-** Youssef, Omar A.S. **Online aplications of Wavelet Transformers tor power system relaying.** IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 18, n°4, Oct. 2003, pp. 1158-1165.
- **36-** Yossef, Omar A.S. **New algorithm to phase selection based on Wavelet Transformers.** IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 17, n°4, Oct. 2002, pp. 908-914.
- **37-** Youssef, Omar A.S. **Fault classification based on Wavelet transforms.** Paper # 01TD069, IEEE, T&D Conference, 28 Oct. Atlanta, Georgia ,2 Nov. 2001.
- 38- Petit, M., Bastard, P. Simulation of a zero-sequence for a distribution network with EMTP-RV. Discrimination between fault current and magnetizing inrush current. International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, Canada on June 19-23, 2005.
- **39-** Mohamed, M. Saied **A study on the inrush current phenomena in transformer subtations.** Department of Electrical Engineering, College of Engineering and Petrolum, Kuwait University. 2001 IEEE.
- **40-** Hamel, A.; St-Jean, G.; Paquette, M. **Nuisance fuse operation on MV transformers during storms.** Institut de recherché d'Hydro-Quebec (IREQ) Varennes, Quebec, Canada. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, nº 4, November 1990.
- **41-** O. Ramsaur **A new approach to cold load restoration.** Eletrical World, vol. 138, pp. 101-103, October 6, 1952.
- **42-** Smithley, R. S. **Normal relay sttings handle cold load.** Eletrical World, vol. 152, pp. 52-54, June 15, 1959.

- **43-** McDonald, J. E.; Bruning, A. M.; Mahieu, W. R. **Cold load pickup.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, n° 4, pp. 1384-1386, July/August 1979.
- **44-** Hatziargyriou, N. D.; Papadopoulos, M. **Transient analyses of extended distribution networks.** IEEE Trans on Power Delivery, vol. 4, n° 2, 1989. pp 1290-1296.
- **45-** Hatziargyriou, N. D.; Papadopoulos, M. **Cold load pickup studies in extended distribution networks.** Eletric Power Division, Department of Electrical Engeeniring, National Technical University, Athens 10682, Greece, 1991.
- **46-** Lang, W. W.; Anderson, M. D.; Fannin, D. R. **An analytical method for quantying the electrical space heating component of cold load pickup. IEEE** Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, n° 4, pp. 924-932, April 1982.
- **47-** Wilde, R. L. Effects of cold load pickup at the distribution substation transformer. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, n° 3, pp. 704-710, March 1985.
- **48-** Aubin, J.; Bergeron, R.; Morin, R. **Distribution transformer overloading capability under cold-load pickup conditions.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, pp. 1883-1891, November 1990.
- **49-** Nehrirrethal, M. H.; Dolan, P. S.; Gerez, V.; Jameson, W. J. **Development and validation of a physically-based computer model for predicting winter electric heating loads.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, n° 1, pp. 266-272, February 1995.
- **50-** Leou, R. C.; Gaing, Z. L.; Lu, C. N.; Chang, B. S.; Cheng, C. L. **Distribution system feeder cold load pick up model.** Electric Power System Research, vol. 36, pp. 163-168, 1996.

- **51-** Lefebvre, S.; Desbiens, C **Residential load modeling for predicting transformer load behavior, feeder load and cold load pickup.** Electric Power and Energy System, vol. 24, pp. 285-293, 2002.
- **52-** Kumar, V; Gupta, I; Gupta, H. O. **An overview of cold load pickup issues in distribution systems. Indian** Institute of Technology, Roorkee, India, 2005.
- 53- Antunes, A. U., Rosa, P. S., Kagan, N. Diagnóstico dos sistemas de aquisição de dados da AES ELETROPAULO. Documento técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERQ-USP / AES ELETROPAULO, Agosto de 2005.
- **54-** Granville, W. A.; Smith, P. F.; Longley, W. R. **Elementos de Cálculo Diferencial e Integral.** Editora Científica, Rio de Janeiro, 1961.
- 55- Cipelli, Antonio M. V.; Sandrini, Waldir J. **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de** Circuitos Eletrônicos. 15ª edição. Editora Érica, 1993.
- **56-** Costa Neto, Pedro Luiz de Oliveira **Estatística.** São Paulo, Editora Edgard Blucler Ltda, 1977.
- 57- Gibbons, J. D. Nonparametric Statistical Inference. McGraw-Hill, New York, 1971.
- 58- Montenegro, Eduardo J. S. Estatística programada passo à passo volume 5. Centrais Impressoras Brasileiras Ltda, 1980.