UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

RHENER FERNANDES LAURETTO

SIMULADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

VITÓRIA – ES

JULHO/2014

RHENER FERNANDES LAURETTO

SIMULADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação de Rhener Fernandes Lauretto, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa

VITÓRIA – ES

JULHO/2014

RHENER FERNANDES LAURETTO

SIMULADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Rhener Fernandes Lauretto, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 21 de julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa
UFES
Orientador

_____

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
UFES
Examinador

_____

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais esta conquista.

Aos meus pais Reinaldo Lauretto e Maria Luiza F. de Paula Lauretto pelo apoio e incentivo por toda a minha vida.

Aos meus irmãos Emmanuela, Graziela e Jônatas, aos meus familiares e amigos que sempre me incentivaram, apoiaram nos momentos difíceis e comemoraram todas as minhas conquistas.

Ao meu orientador Professor Doutor Gilberto Costa Drumond Sousa pela paciência, dedicação e contribuição para a execução deste trabalho e pela divisão de conhecimentos que me proporcionou durante a produção deste projeto.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, que contribuíram pelos conhecimentos e experiências adquiridas durante a graduação.

RESUMO

O recurso da energia elétrica e a disponibilidade da mesma representa um aumento significativo na qualidade de vida da população. A partir do momento que uma região tem acesso a energia elétrica, pode-se ver inúmeros benefícios para aquela área, desde conforto que a população poderá desfrutar em sua residência, até a geração de empregos.

Contudo, à medida que cresce o número de consumidores, inicia o processo de discussão de procedimentos relativos à qualidade do produto que está sendo comercializado. Fica evidente que qualquer transtorno no sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica trará consequências para os clientes.

Para evitar esses transtornos, criaram-se Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (3), a fim de minimizar as perturbações que podem acontecer no sistema elétrico.

Este projeto descreve as principais características da Qualidade de Energia Elétrica - QEE, ressaltando normas, procedimentos e por fim cria-se um simulador para melhor visualização dos fenômenos abordados.

Palavras Chave: Qualidade de Energia Elétrica. PRODIST, Simulink, SIMPOWERSYSTEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Faixas de Tensão Elétrica em Relação à de Referência.....16
Figura 2: Exemplo de Medição em um Consumidor na Faixa de Tensão de 1 kV à 69 kV 18
Figura 3: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Tensão em Regime Permanente 23
Figura 4: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 1 25
Figura 5: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 4 25
Figura 6: Formas de Onda Distorcidas por Harmônicas de 3ª e 5ª ordem.....27
Figura 7: Distorção da Corrente Causada por Carga não Linear 28
Figura 8: Representação da Série de Fourier da Distorção Harmônica 29
Figura 9: Presença de Harmônicas na Rede Elétrica.....30
Figura 10: Magnitude das Componentes Harmônicas Obtidas da Transformada de Fourier 30
Figura 11: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Harmônica 37
Figura 12: Representação Simplificada de uma Indústria com Carga não Linear.....38
Figura 13: Tensão no Barramento de Entrada da Fábrica 39
Figura 14: Espectro da Tensão no Barramento de Entrada da Fábrica 40
Figura 15: Corrente no Barramento de Entrada da fábrica 40
Figura 16: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 3.....41
Figura 17: Espectro da Tensão no Barramento de Entrada da Residência 3 42
Figura 18: Corrente de Entrada da Residência 3 42
Figura 19: Flutuação de Tensão na Rede Elétrica 46
Figura 20: Visibilidade de Flicker em Lâmpadas Incandescentes 47
Figura 21: Visibilidade de Flicker.....48
Figura 22: Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.....50
Figura 23: Diagrama Trifilar Simplificado de uma Instalação com Forno a Arco Direto 55
Figura 24: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Flutuação de Tensão 57
Figura 25: Representação de um Forno a Arco Direto em uma Indústria 58
Figura 26: Flutuação da Tensão no Barramento de Entrada da Fábrica.....59
Figura 27: Flutuação da Tensão eficaz no Barramento de Entrada da Fábrica. 60

Figura 28: Flutuação da Tensão eficaz no Barramento da Residência 2 60
Figura 29: Variações de Tensão de Curta Duração 63
Figura 30: Composição do Prejuízo Industrial.....65
Figura 31: Interrupção Momentânea de Tensão 65
Figura 32: Afundamento Momentâneo de Tensão 66
Figura 33: Elevação Momentânea de Tensão.....67
Figura 34: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Curto - Circuito 69
Figura 35: Curva de Corrente x Tempo dos fusíveis tipo H.....70
Figura 36: Corrente de curto circuito fase terra no nível de tensão 11,4 kV.....71
Figura 37: Caminho da corrente em um curto circuito fase-terra 71
Figura 38: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 1.....72
Figura 39: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 3.....73
Figura 40: Tensão Eficaz no Barramento de Entrada da Fábrica.....74
Figura 41: Tensão Eficaz no Barramento de Entrada da Residência 3.....75
Figura 42: Tensão Eficaz no Barramento de Entrada da Residência 1.....75
Figura 43: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Elevação de Tensão 77
Figura 44: Barramento de Entrada da Residência 1 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distúrbios Comuns na Rede Elétrica 13
Tabela 2: Pontos de Conexão em Tensão Nominal Superior a 1 kV e Inferior a 69 kV 17
Tabela 3: Pontos de Conexão em Tensão Nominal Igual ou Inferior a 1kV (220/127) 17
Tabela 4: Dimensão da Amostra Trimestral 20
Tabela 5: Parâmetros do Simulador para Estudo de Tensão em Regime Permanente 24
Tabela 6: Níveis de Referência para Distorções Harmônicas Individuais de Tensão (em percentagem da tensão fundamental) 32
Tabela 7: Valores de Referências Globais da DTT (em porcentagem da tensão fundamental) 34
Tabela 8: Parâmetros do Simulador para Estudo de Harmônica 38
Tabela 9: Níveis de Harmônicas nos Barramentos 43
Tabela 10: Distorções Harmônicas Individuais nos Barramentos 44
Tabela 11: Distorção Harmônica Total nos Barramentos 44
Tabela 12: Valores de Referência para a Flutuação de Tensão 51
Tabela 13: Fatores de Transferência 52
Tabela 14: Características básicas dos fornos a arco direto 54
Tabela 15: Parâmetros do Simulador para Estudo de Flutuação de Tensão 58
Tabela 16: Tensões em pu dos barramentos 61
Tabela 17: Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração 64
Tabela 18: Parâmetros do Simulador para Estudo de Curto-Circuito 68
Tabela 19: Parâmetros do Simulador para Estudo de Elevação de Tensão 77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

DTT – Distorção Harmônica Total

FFT – Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)

IEEE – *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

ONS – Operador Nacional do Sistema

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

RMS – Root Mean Square

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

1.1 Qualidade de Energia Elétrica 12

1.2 Objetivo 15

1.3 Simulador 15

2 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE 16

2.1 Indicadores Individuais de Conformidade de Tensão 18

2.2 Indicadores Coletivos de Conformidade de Tensão 19

2.3 Compensação ao Consumidor 21

2.4 Simulação 22

2.5 Conclusões Específicas 26

3 HARMÔNICAS NO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA 27

3.1 Distorções Harmônicas 28

3.2 Indicadores harmônicos 31

3.2.1 Distorção Harmônica Individual (DIT_h) 31

3.2.2 Distorção Harmônica Total (DTT) 32

3.3 Equipamentos Geradores de Harmônicas 34

3.4 Simulação 36

3.5 Conclusões Específicas 45

4 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO 46

4.1 Indicadores de Flutuação de Tensão 48

4.1.1 Método Padrão UIE 49

4.2 Normatização 51

4.3 Equipamentos Geradores de Flutuações de Tensão 52

4.3.1 Fornos Elétricos 53

4.3.1.1 Forno a Arco 53

4.4 Simulação 57

4.5 Conclusões Específicas 61

5 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO 63

5.1 Interrupção e Afundamento de Tensão 65

5.2 Elevação de Tensão.....67

5.3 Normatização 67

5.4 Simulação 68

5.4.1 Curto Circuito.....68

5.4.2 Partida de Motores 73

5.4.3 Elevação de Tensão 76

5.5 Conclusões Específicas 78

6 CONCLUSÕES GERAIS 80

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....82

1 INTRODUÇÃO

1.1 Qualidade de Energia Elétrica

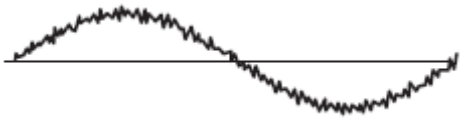
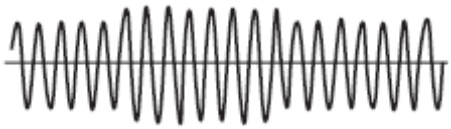
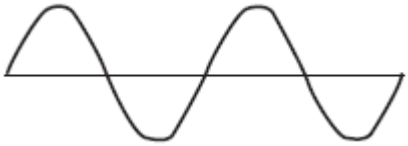
Durante muitos anos, desde a consolidação do sistema elétrico mundial, no século XX, onde as cargas eram basicamente lineares, a única preocupação das distribuidoras de energia elétrica era prover energia os seus consumidores (1).

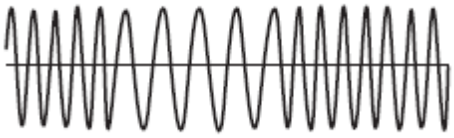
Até a década de 70, uma residência típica no Brasil era formada por cargas resistivas tais como chuveiro elétrico, ferro de passar roupa à resistência elétrica, lâmpadas incandescentes e salvo as exceções, televisor. (2)

No passar das décadas, com desenvolvimento da indústria nacional e da qualidade de vida da população, passou-se a ter maiores demandas de cargas como máquinas elétricas, fornos elétricos, dispositivos eletroeletrônicos, lâmpadas fluorescentes, televisores e vários outros dispositivos com características não lineares (cargas com relação não linear de tensão x corrente).

Com este aumento de cargas e consumidores, aumentaram-se os problemas na rede de energia elétrica, como por exemplo, gerações de frequências harmônicas, variações de tensão, flutuações de tensão, variações de frequência, desequilíbrio de tensão, dentre outros (1). Estes problemas, provocados por equipamentos interligados à rede de energia elétrica ou por fenômenos naturais, acarretam consequências tanto para os consumidores, quanto para as concessionárias de energia elétrica, pois para o funcionamento adequado dos equipamentos e do sistema elétrico é necessário que os índices da amplitude da tensão e frequência fundamental (60 Hz no Brasil) da onda senoidal estejam em padrões definidos. Qualquer desvio nesses índices são problemas de qualidade de energia elétrica. A tabela 1 contem a descrição e exemplos de alguns distúrbios comuns de tensão na rede elétrica que afetam a qualidade de energia elétrica.

Tabela 1: Distúrbios Comuns na Rede Elétrica

Tipo de Distúrbio	Descrição	Exemplo de Causas
	Surto (ou impulso): pulso rápido, com rápida subida e decaimento oscilatório amortecido ou exponencial; de 50V a 6kV, com 0,5us a 2ms de duração.	Chaveamento de cargas, chaveamento de equipamentos da rede, raios.
	**EMI**: distúrbios repetitivos de baixa energia na faixa de 10kHz a 1GHz, com 100mV a 100V de amplitude.	Equipamentos operando (fontes chaveadas, etc), Interferência de sinais das transmissões em radio-frequência.
	Afundamentos: redução da tensão por mais de um período.	Partida de cargas pesadas, chaveamento de equipamentos da rede.
	**Elevação**: elevação da tensão por mais de um período.	Redução de carga, chaveamento de equipamentos da rede.
	Flutuação: flutuações repetitivas no nível de tensão, causando uma “modulação” da tensão da rede.	Cargas pulsantes (e.g. forno a arco).
	Notches: repetitivos afundamentos da tensão de curta duração.	Comutação de corrente em retificadores trifásicos (controlados ou não).
	**Distorção da forma de onda**: distorção na forma da onda ideal de tensão, devido à presença de harmônicas e inter-harmônicas.	Retificadores e outras cargas não-lineares e/ou intermitentes.

Tipo de Distúrbio	Descrição	Exemplo de Causas
	**Variação de Frequência:** desvio da frequência nominal.	Equipamentos da rede de fraco desempenho, problemas na geração.
	Interrupção: tensão nula em uma ou mais fases.	Curto-circuito, falha de equipamentos da rede, acidentes, raios, fenômenos naturais.

Fonte: COLNADO, (2009).

O termo “Qualidade de Energia Elétrica” teve sua primeira referência em 1968, em um artigo da marinha norte-americana sobre um estudo realizado nas especificações da alimentação dos aparelhos eletrônicos do sistema.

Mesmo o termo Qualidade de Energia Elétrica – QEE ter sido noticiado na década de 60, a área da qualidade de energia elétrica é uma área extremamente nova. No Brasil, apenas no ano de 2008, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou o documento de Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (3) abordando assuntos sobre a qualidade do produto e do serviço comercializado no país.

Devido à novidade do termo no país, vê-se a necessidade de cada vez mais estudos na área de QEE, de forma a mitigar os problemas que afetam a qualidade de energia. Neste trabalho foram analisados os procedimentos, normatizações, e os parâmetros para determinar a qualidade do produto comercializado no Brasil a fim de se obter um material de apoio à área de qualidade de energia elétrica.

Os capítulos seguintes deste projeto indicarão as principais caracterizações, medições, normatizações e simulações dos principais problemas que afetam os índices de qualidade de energia elétrica descritos no módulo 8 – PRODIST.

1.2 Objetivo

O projeto tem como objetivo criar um material didático que possa ser utilizado como material de apoio às disciplinas relacionadas à qualidade de energia elétrica. O material terá uma documentação do que é Qualidade de Energia Elétrica, quais os fenômenos envolvidos, toda a normatização no Brasil referente ao termo QEE e na elaboração de um simulador para que possa visualizar o comportamento de um sistema elétrico equilibrado sob a ocorrência de distúrbios elétricos que comprometam a QEE.

1.3 Simulador

O projeto de graduação consiste na caracterização dos principais problemas na rede elétrica que afetam os índices relacionados com a qualidade do produto descritos no PRODIST pela ANEEL (3) e na criação de um ambiente de simulação para visualização de tais efeitos em um sistema elétrico equilibrado.

O ambiente de simulação foi desenvolvido no software matlab utilizando a biblioteca simpowersystem do ambiente de simulação simulink (5). Os parâmetros para criação do ambiente, por exemplo, potência das cargas, impedâncias das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, ajustes dos parâmetros do simulador, métodos de ligações dos transformadores e cargas foram especificadas a partir das bibliografias estudadas, tendo como referências diversos projetos de graduação, teses e livros didáticos descritos na bibliografia do projeto.

Cada capítulo possui uma abordagem específica do simulador para o efeito estudado, assim cada efeito contará com uma topologia específica de carga e transformadores detalhados nos capítulos. O simulador mostrará principalmente a tensão em regime permanente em pontos estratégicos do sistema, níveis de harmônico, flutuação de tensão e outras medições específicas para cada análise.

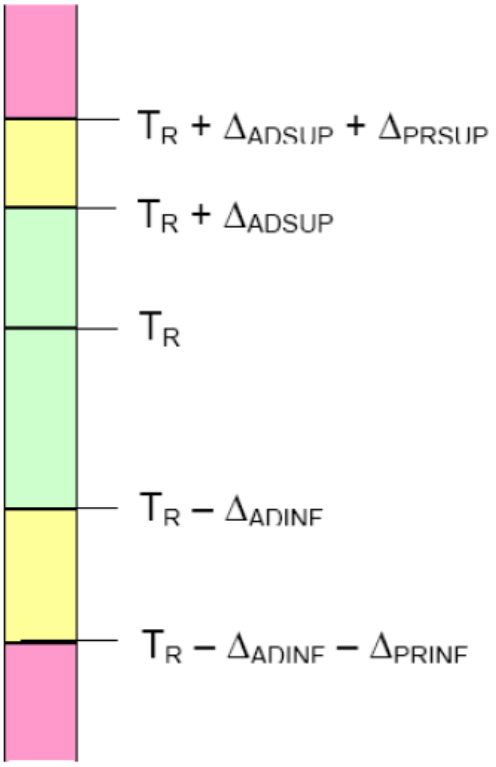
O simulador não contará com análise da qualidade do serviço, termo também correlacionado com a qualidade de energia elétrica e descrito no módulo 8 do PRODIST. O simulador ilustrará somente a qualidade do produto comercializado, sendo o objeto deste projeto.

2 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

É ideal que o consumidor de energia elétrica, seja suprido por uma tensão mais constante possível em regime permanente para melhor funcionamento dos equipamentos elétricos. Com a evolução da tecnologia, os equipamentos são mais sensíveis a variações de tensão, causando problemas em seu funcionamento. Assim é de obrigação da distribuidora fornecer um produto com uma qualidade mínima estabelecida por norma para que os clientes não sofram consequências indevidas.

A normatização no Brasil é feita pela ANEEL que caracteriza no módulo 8 do PRODIST os limites adequados, precários e críticos de tensão em regime permanente para os diferentes níveis de tensão elétrica que os clientes são abastecidos. A figura 1 mostra de uma maneira geral, as faixas de tensão em relação à tensão de referência. (3)

Figura 1: Faixas de Tensão Elétrica em Relação à de Referência



Fonte: ANEEL, (2012).

Onde:

Tr – Tensão de Referência;

(T_R-Δ_{ADINF}, T_R+ Δ_{ADSUP}) – Faixa Adequada de Tensão;

(T_R + Δ_{ADSUP}, T_R + Δ_{ADSUP} + Δ_{PRSUP} OU T_R - Δ_{ADINF} - Δ_{PRINF}, T_R - Δ_{ADINF}) – Faixas Precárias de Tensão;

(>T_R + Δ_{ADSUP} + Δ_{PRSUP} OU < T_R - Δ_{ADINF} - Δ_{PRINF}) - Faixas Críticas de Tensão.

A tensão de referência será a tensão nominal ou a tensão contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão. As tabelas 2 e 3 detalham os níveis de tensão adequada, crítica e precária para alguns casos de tensão nominal. Para outros casos de tensão nominal, encontram-se em detalhes no módulo 8 do PRODIST (3).

Tabela 2: Pontos de Conexão em Tensão Nominal Superior a 1 kV e Inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	**Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)**
Adequada	0,93TR≤TL≤1,05TR
Precária	0,90TR≤TL≤0,93TR
Crítica	TL<0,90TR ou TL> 1,05TR

Fonte: ANEEL, (2012).

Tabela 3: Pontos de Conexão em Tensão Nominal Igual ou Inferior a 1kV (220/127)

Tensão de Atendimento (TA)	**Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em (Volts)**
Adequada	(201≤TL≤231) / (116≤TL≤133)
Precária	(189≤TL<201 ou 231<TL≤233) / (109≤TL<116 ou 133<TL≤140)
Crítica	(TL<189 ou TL>233) / (TL<109 ou TL>140)

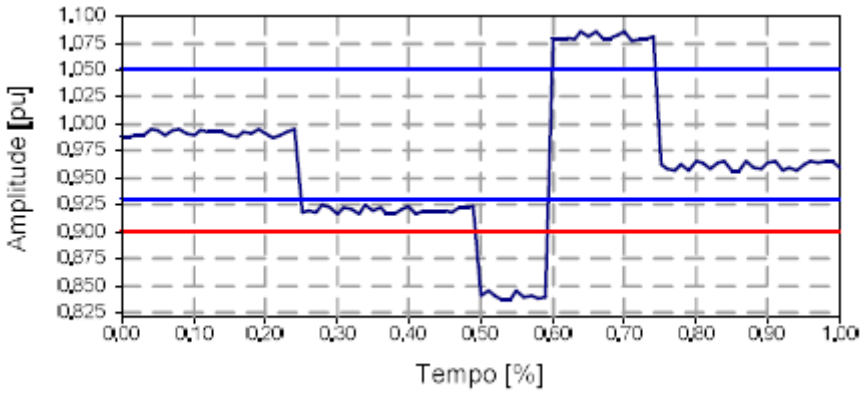
Fonte: ANEEL, (2012).

Como dito, a concessionária de energia elétrica deve sempre manter os limites de tensão na faixa adequada, porém sabemos que nem sempre é possível devido às inúmeras situações que a rede está submetida. Sendo assim, a partir da tensão de referência citada acima, o PRODIST estabelece os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão, na qual se refere à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada em relação aos níveis de tensão

especificados como adequados, precários ou críticos conforme descritos anteriormente.

A figura 2 mostra um exemplo de leitura da tensão em um consumidor com tensão nominal na faixa de 1 kV a 69 kV. Na figura observa-se que nos tempos de 0 a 0,25% e após 0,75% do tempo de leitura, a tensão se encontra dentro do limite adequado de tensão. Durante o período de 0,25% a 0,5% do tempo de leitura a tensão se encontra dentro do limite precário, e no tempo de 0,5% a 0,75% do tempo total de leitura a tensão se encontra dentro do limite crítico de tensão.

Figura 2: Exemplo de Medição em um Consumidor na Faixa de Tensão de 1 kV à 69 kV



Fonte: FRIZERA, (2013).

2.1 Indicadores Individuais de Conformidade de Tensão

Os índices de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e tensão crítica (DRC) são índices de indicadores individuais calculados pela ANEEL (3) com o propósito da averiguação da qualidade do produto que está sendo comercializado pela distribuidora nos barramentos de entrada dos seus clientes.

Antes da caracterização dos índices individuais, cabe à distribuidora realizar a coleta dos dados da tensão das unidades consumidoras. Os dados são obtidos por aparelhos que operem com amostragem digital a uma taxa de 16 amostras por ciclo, com precisão de 1% da leitura e deve armazenar os valores eficazes das tensões em intervalos de 10 minutos. As medições dos valores eficazes devem ser feitas com um período de observação de no mínimo de 168 horas consecutivas totalizando 1008 leituras válidas. A partir dessas leituras devem ser calculados índices individuais (DRP e DRC) de acordo com as equações abaixo.

$$DRP = \frac{nlp * 100}{1008} \ [\%] \tag{2.1}$$

$$DRC = \frac{nlc * 100}{1008} \ [\%] \tag{2.2}$$

Onde:

nlp- Maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária

nlc- Maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica

A ANEEL especifica no PRODIST o valor máximo permitido de 3% para o indicador DRP e de 0,5% para o indicador DRC. Caso os valores de DRP ou DRC estejam superiores aos permitidos por lei, os indicadores são utilizados como critério de compensação ao consumidor, conforme descritos na seção 2.3.

Além de servirem como índices de comparação com os valores de referência, estes indicadores são utilizados posteriormente para calcular os indicadores coletivos de conformidade de tensão, descritos no próximo item.

2.2 Indicadores Coletivos de Conformidade de Tensão

Com base nos DRP(s) e DRC(s) dos consumidores, são calculados os índices coletivos de conformidade de tensão descritos pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST. Estes índices são utilizados pelas concessionárias e pela Agência Nacional como critérios de gestão da qualidade da tensão. (3)

Os indicadores coletivos equivalentes são calculados com base em amostras de consumidores obtidos pelas distribuidoras de energia elétrica. A tabela 4 mostra a quantidade de amostras que cada distribuidora deve ter em um período trimestral. As medições das tensões de cada amostra de consumidores são as mesmas descritas anteriormente na seção 2.1. Após as medições, as distribuidoras devem enviar para a Agência Nacional de Energia Elétrica os dados de medição, e posteriormente os índices coletivos serão calculados pela mesma.

Tabela 4: Dimensão da Amostra Trimestral

Numero total de unidades consumidoras da distribuidora	Dimensão da amostra (unidades consumidoras)	Dimensão da amostra com a margem de segurança (unidades consumidoras)
N≤10.000	26	30
10.001≤N≤30.000	36	42
30.001≤N≤100.000	60	66
100.001≤N≤300.000	84	93
300.001≤N≤600.000	120	132
600.001≤N≤1.200.000	156	172
1.200.001≤N≤2.000.000	210	231
2.000.001≤N≤3.000.000	270	297
N≥3.000.0001	300	330

Fonte: ANEEL, (2012).

Os três índices coletivos são: índice de unidades consumidoras com tensão crítica (ICC), índice de duração relativa da transgressão para tensão precária equivalente (DRP_E) e índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica equivalente (DRC_E), sendo calculados a partir das equações seguintes.

$$ICC = \frac{N_C}{N_L}.100\ [\%] \tag{2.3}$$

$$DRP_E = \sum \frac{DRP_i}{N_L}\ [\%] \tag{2.4}$$

$$DRC_E = \sum \frac{DRC_i}{N_L}\ [\%] \tag{2.5}$$

Onde:

ICC– Índice de unidades consumidoras com tensão crítica;

N_c – Total de unidades consumidoras com DRC não nulo;

N_L – Número total de unidades consumidoras da amostra;

DRP_i – Duração relativa de transgressão de tensão precária individual da unidade consumidora (i);

DRC_i – Duração relativa de transgressão de tensão crítica individual da unidade consumidora (i);

DRP_E – Duração relativa de transgressão de tensão precária equivalente;

DRC_E – Duração relativa de transgressão de tensão crítica equivalente.

2.3 Compensação ao Consumidor

A ANEEL estabeleceu para os índices DRP e DRC os valores máximos permitidos de 3% e 0,5% respectivamente. Caso algum dos valores calculados na seção 2.1 estejam superiores aos valores de referência descritos pela Agência Nacional, a concessionária tem o prazo máximo de 90 dias para regularização da tensão de atendimento caso seja índice de tensão precária (DRP) que esteja acima do permitido e 15 dias para regularização da tensão de atendimento caso seja o índice de tensão crítica (DRC) que esteja superior ao permitido.

Passado o período para regularização das tensões de atendimento e consequente a não regularização dos níveis de tensão a distribuidora deverá realizar uma compensação financeira para as unidades consumidoras prejudicadas e aquelas atendidas pelo mesmo ponto de conexão de energia elétrica. O cálculo da compensação é realizado através da equação 2.6.

$$Valor = \left[\left(\frac{DRP - DRP_M}{100}\right) * K_1 + \left(\frac{DRC - DRC_M}{100}\right) * K_2\right] * EUSD \tag{2.6}$$

Onde:

$K_1 = 0$, se $DRP \leq DRP_M$;

$K_1 = 3$, se $DRP > DRP_M$;

$K_2 = 0$, se $DRC \leq DRC_M$;

$K_2 = 7$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_M$;

$K_2 = 5$, para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão, se $DRC > DRC_M$;

$K_2 = 3$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão, se $DRC > DRC_M$;

DRP= valor do DRP expresso em %, apurado na última medição;

$DRP_M = 3\%$;

DRC= valor do DRC expresso em %, apurado na última medição;

$DRC_M = 0{,}5\%$;

$EUSD$= valor do encargo de uso do sistema de distribuição referente ao mês de início da realização da medição pelo período mínimo de 168 horas.

A compensação será mantida enquanto os indicadores DRP ou DRC forem superiores ao DRP_M e DRC_M respectivamente.

2.4 Simulação

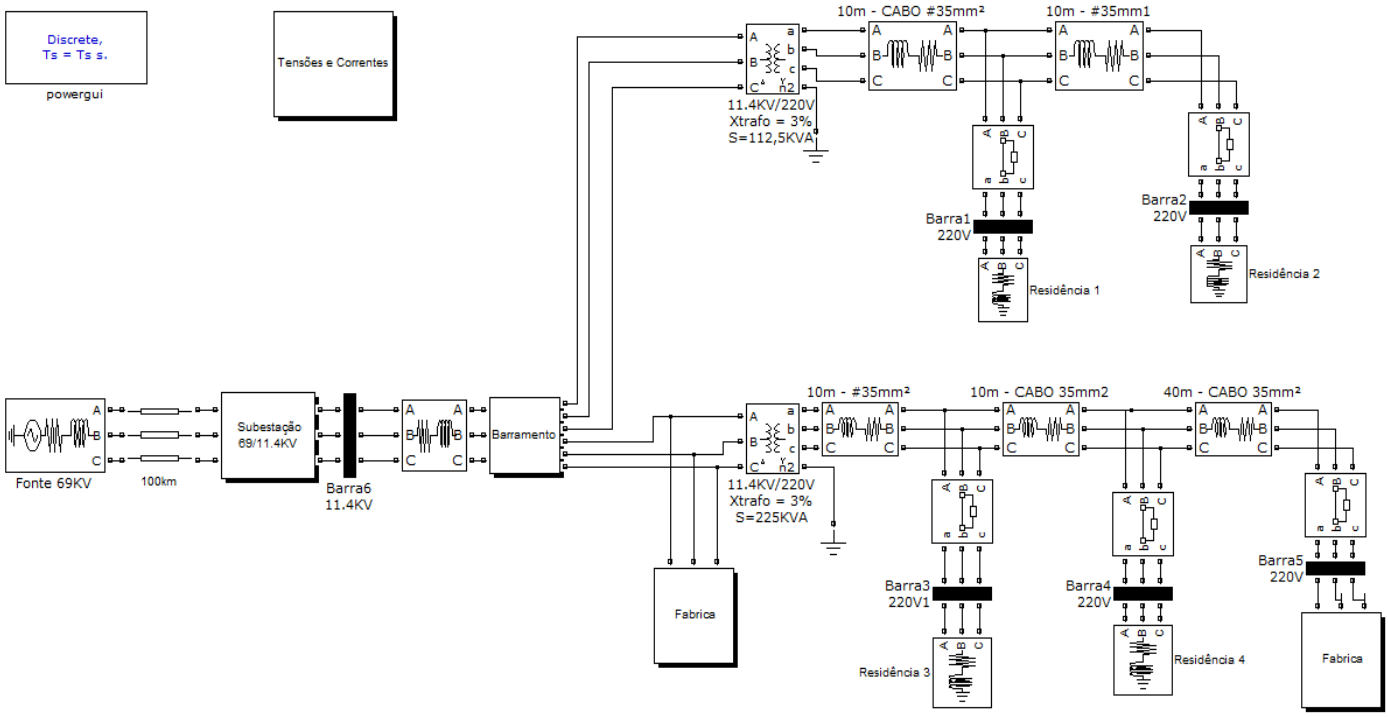
A visualização dos efeitos de tensão em regime permanente está implícita em todas as etapas de simulação do projeto. Esta etapa do projeto demonstrará um caso simples dos efeitos de tensão em regime permanente em um sistema no período de carga leve e carga pesada, e as consequências que consumidores de energia elétrica podem sofrer.

As distribuidoras de energia elétrica, em todo momento ajustam os parâmetros da linha (compensadores, reguladores de tensão, etc.) a fim de manter os níveis de tensão nos barramentos dos consumidores dentro dos limites adequados estipulados pela ANEEL conforme descrito no capítulo presente. Nos períodos de carga pesada no sistema elétrico, onde possuímos grandes demandas de energia elétrica, é natural a amplitude da tensão diminuir devido à alta requisição de potência, e durante os períodos de carga leve é natural uma elevação de tensão.

A figura 3 mostra o sistema elétrico utilizado para demonstração de um sistema com carga pesada e carga leve, no ambiente Sumulink/Matlab. Note que, após a

subestação, encontramos um barramento com dois ramais de saída. O primeiro ramal contém uma grande concentração de carga, sendo composta por fábricas alimentadas em média tensão e um sistema de distribuição de baixa tensão. O segundo ramal de saída do barramento é composto por um sistema de distribuição em baixa tensão contando apenas com cargas de baixa potência (residências). Os dados elétricos do sistema estão descritos na tabela 5.

Figura 3: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Tensão em Regime Permanente



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5: Parâmetros do Simulador para Estudo de Tensão em Regime Permanente

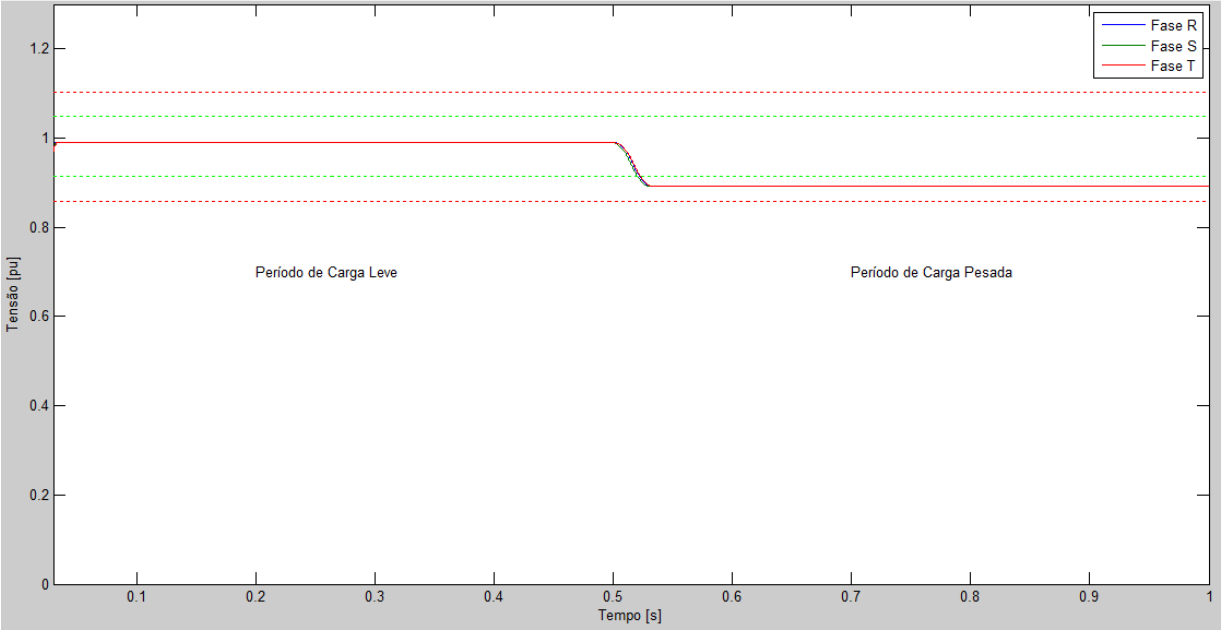
	Bloco	Parâmetros
TRANSMISSÃO	Fonte 69 kV	Vn=69 kV; X/R = 1,84026
	LT 100 km	Distância=100Km; R1=0,01273 Ω/Km; R0=0,3864Ω/Km; L1=0,9337mH/Km; L2=4.1264mH/Km; C1=12.74nF/Km; C2=7,751nF/Km
	Subestação	Transformador: 1MVA; Zt=9,31%; 69kV:11,4kV
DISTRIBUIÇÃO	Fábrica Média Tensão	Transformador: 500KVA; Zt=3%; 11,4kV:220V; Carga: 220V;P=368kW;Q=156,77kVAr
	Cabo 35mm²	R=0,87211 Ω/Km; L=0,34140 Ω/Km
	Cabo 70mm²	R=0,5694 Ω/Km; L=0,0727 Ω/Km
	Residências	Carga: 220V; P= 30kW; Q=4,93kVAr
	Fábrica Baixa Tensão	Carga: 220V; P= 60kW; Q=9,86kVAr

Fonte: Próprio autor.

A situação do sistema de carga leve será composta somente com as cargas residenciais funcionando, e a situação do sistema com carga pesada contará com as cargas residenciais e as duas fábricas funcionando.

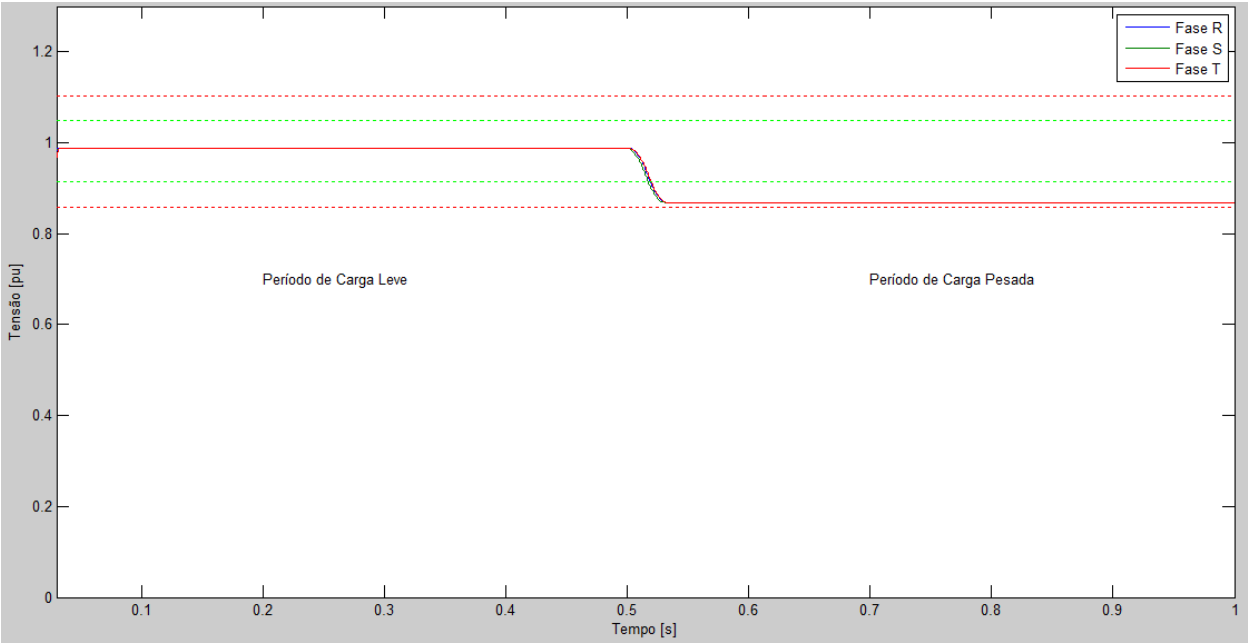
As figuras 4 e 5 mostram os barramentos residenciais das residências 1 e 4 para os períodos de carga leve e carga pesada. Note que, no momento de carga leve, as tensões dos barramentos das duas residências se encontram dentro da região adequada de tensão proposto pela ANEEL. No período de carga pesada a tensão da residência 1 diminui e atinge a região crítica de tensão, acontecendo o mesmo com a tensão no barramento da residência 4. Devido à simetria do sistema as tensões dos barramentos das outras residências sofreriam efeitos semelhantes. Nas figuras a tensão de base do sistema é 127 V_{rms} (fase-neutro) e as linhas vermelhas e verdes tracejadas representam os limites de tensão adequada e precária nos sistema de 220/127 V_{rms}, respectivamente.

Figura 4: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 1



Fonte: Próprio autor.

Figura 5: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 4



Fonte: Próprio autor.

Nessas residências, mostradas nas figuras acima, caso houvesse reclamações dos consumidores e pedidos de medições conforme visto no capítulo, de acordo com as normatizações nacionais a distribuidora deveria compensar a queda de tensão nos ramais e solucionar tais problemas. As possíveis soluções seria adicionar compensadores, reguladores de tensão na linha, ou aumentar a potência dos

transformadores de acordo com as legislações locais. Caso não fosse possível uma solução imediata, os consumidores seriam ressarcidos financeiramente conforme discutido na seção 2.3.

2.5 Conclusões Específicas

No capítulo presente, foram apresentadas as definições de tensão em regime permanente, as principais normatizações no sistema brasileiro sendo utilizadas no projeto. Foram também expostas à metodologia de medição de tensão em regime permanente e cálculos de possíveis compensações ao consumidor de energia elétrica.

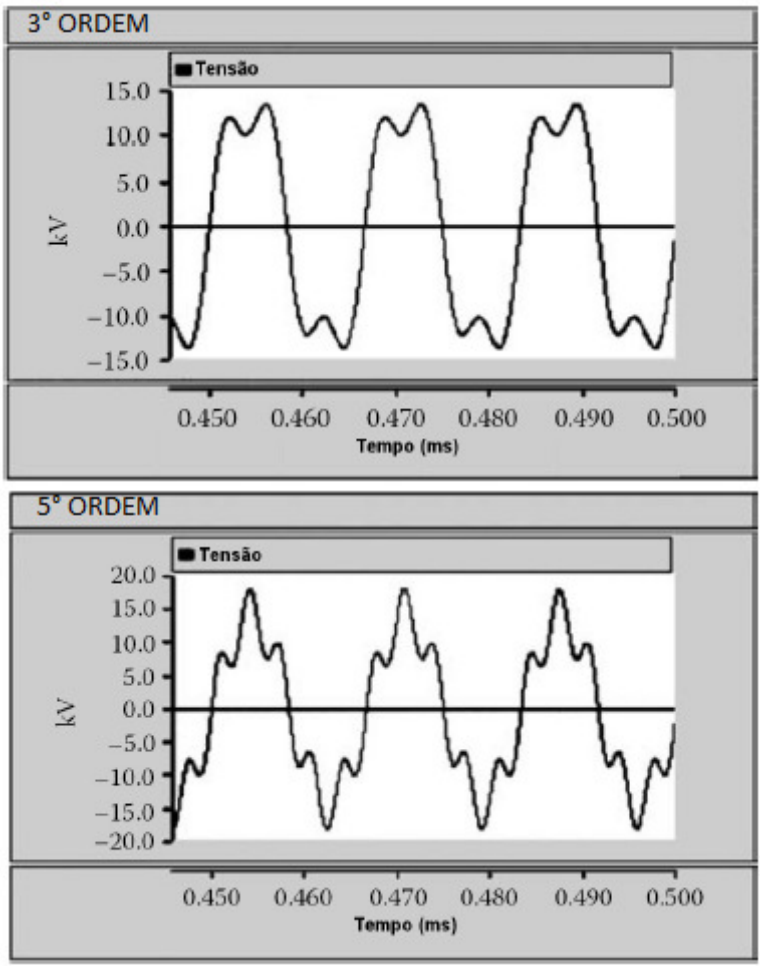
Pode-se ver que o cliente de energia elétrica nos últimos anos é amparado por normatizações. A qualquer momento, o cliente que se sinta prejudicado pelo fornecimento de energia elétrica, pode pedir medições dos níveis de tensão em seu estabelecimento e caso constatado alguma anomalia é dever da distribuidora sanar o problema. Assim vê-se a preocupação das distribuidoras em sempre fornecer um produto com a melhor qualidade possível para os seus clientes.

3 HARMÔNICAS NO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

Distorção harmônica é um tipo específico de distúrbio na energia elétrica, deixando a forma de onda da energia elétrica “suja”. Diferente dos transientes de tensão e corrente, as distorções harmônicas estão presentes continuamente na forma de onda. (2)

Enquanto há poucos casos onde a distorção harmônica é aleatória, a maior parte das distorções harmônicas são periódicas ou múltiplas da frequência fundamental do sistema elétrico. O termo harmônica é utilizado para referir à distorção da forma de onda da tensão e da corrente (7). A figura 6 mostra formas de onda distorcidas por harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

Figura 6: Formas de Onda Distorcidas por Harmônicas de 3ª e 5ª ordem.



Fonte: SILVA, (2008).

No capítulo presente, serão abordados alguns indicadores relacionados ao estudo de componentes harmônicas, as principais cargas que produzem o distúrbio, os efeitos no sistema de energia e a simulação de harmônicas no sistema elétrico objetivando um entendimento de suas características.

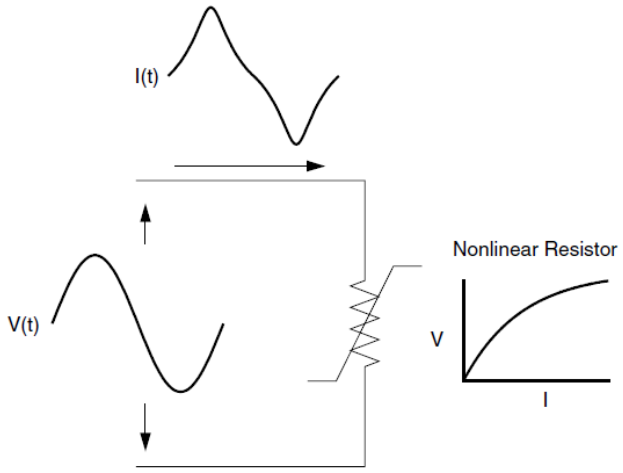
Posteriormente, serão abordadas as normatizações brasileiras referentes ao fenômeno.

3.1 Distorções Harmônicas

De acordo com a ANEEL, *"As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental." (3)*

De maneira geral, harmônicas são formas de ondas senoidais, que podem ocorrer nos sinais de tensão e corrente, com frequência múltipla inteira da frequência fundamental. A presença de harmônicas está associada ao crescente número de cargas elétricas com características não lineares, por exemplo, inversores de frequência, retificadores de tensão, variadores de velocidade, computadores, dentre outros equipamentos, presentes no sistema elétrico. As harmônicas causam distorções na onda da tensão e corrente, nas quais se deseja ter ondas perfeitamente senoidais. A figura 7 ilustra a concepção da distorção harmônica na corrente causada por uma carga não linear. (9)

Figura 7: Distorção da Corrente Causada por Carga não Linear



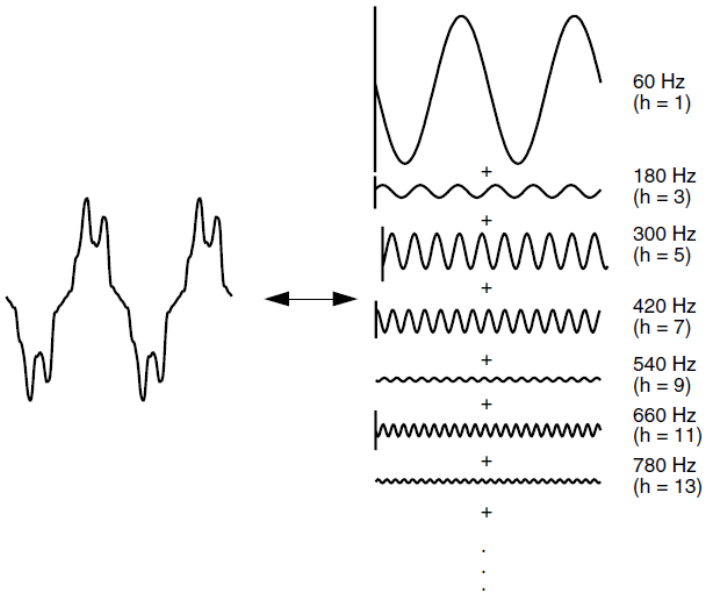
Fonte: DUGAN, (2003).

As harmônicas não múltiplas da frequência fundamental são denominadas de interharmônicas e costumam originar com cargas que consomem corrente com forma de onda não periódica, por exemplo, cicloconversores, fornos a arco. (2)

Este tipo de distorção seja harmônica ou interharmônica infringe gravemente a qualidade de energia elétrica comercializada pelas concessionárias. Tensões fornecidas pelas concessionárias devem ser puramente senoidais, com amplitude e frequência dentro dos limites toleráveis, como visto no capitulo 2 “Tensão em Regime Permanente”. A presença de harmônicas no sistema elétrico é prejudicial para todos os consumidores que utilizam a rede, não se restringindo somente ao consumidor que gera tal problema, assim legislações nacionais especificam limites máximos de harmônicas no sistema elétrico a fim de minimizar os efeitos que as harmônicas geram para o sistema.

As harmônicas no sistema elétrico podem ser analisadas graças a uma ferramenta matemática denominada Série de Fourier, na qual se refere ao nome do matemático Fourier que descobriu tal feito. A teoria da Série de Fourier diz que uma onda é composta por infinitas formas de ondas de frequência múltipla da onda fundamental. A figura 8 mostra a série de Fourier em uma onda distorcida com frequência fundamental de 60 Hz contendo a presença de harmônicas.

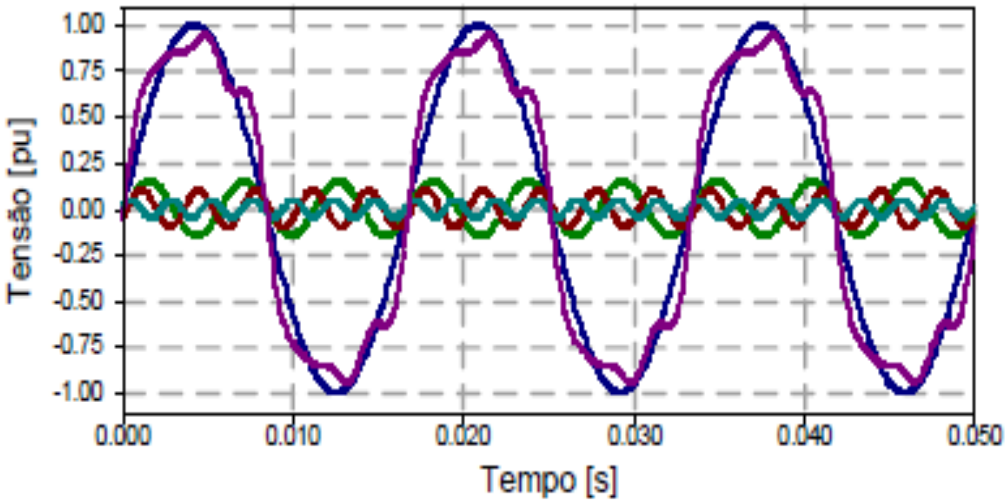
Figura 8: Representação da Série de Fourier da Distorção Harmônica



Fonte: DUGAN, (2003).

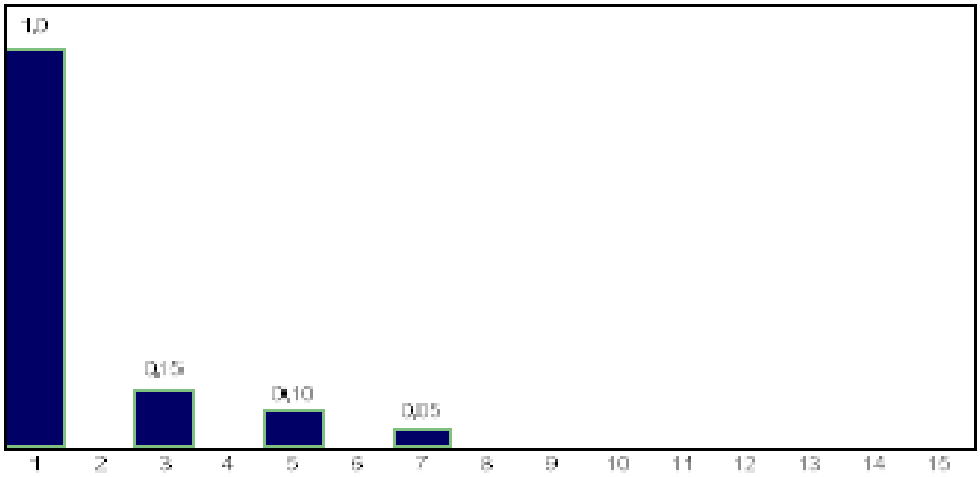
A partir da teoria da Série de Fourier, pode-se decompor uma onda distorcida em uma série infinita de ondas múltiplas da fundamental, aplicando a Transformada de Fourier, ficando mais fácil o cálculo dos indicadores harmônicos descritos nas próximas seções. A figura 9 mostra a forma de onda da tensão da rede elétrica com a presença de harmônicas e a figura 10 mostra o resultado da transformada de Fourier do sistema.

Figura 9: Presença de Harmônicas na Rede Elétrica



Fonte: FRIZERA, (2013).

Figura 10: Magnitude das Componentes Harmônicas Obtidas da Transformada de Fourier



Fonte: FRIZERA, (2013).

Analisando os efeitos das harmônicas no sistema elétrico, podem ser feitas duas generalizações: (7)(9)

• Geralmente, as componentes harmônicas que causam problemas são as de ordem ímpar;
• A amplitude da corrente harmônica diminui com o aumento do valor da frequência.
• Harmônicas de ordem h = 1, 7, 13... são típicos em sequência positiva.
• Harmônicas de ordem h = 5, 11, 17... são típicos em sequência negativa.
• Harmônicas de ordem h = 3, 9, 15, 21... são típicos em sequência zero.

3.2 Indicadores harmônicos

Devido às complicações causadas por harmônicas na rede elétrica, foi necessária à limitação das mesmas através de normas que especifiquem os níveis máximos, admissíveis de harmônicas no sistema elétrico.

No Brasil, as distorções harmônicas são avaliadas individualmente e em sua composição total. Os indicadores documentados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e regulamentados pela ANEEL são o DHT_V (Distorção harmônica Total de Tensão) e o DIT_h (Distorção Harmônica Individual de Tensão). Os indicadores são especificados no módulo 8 do PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) (3), especificando a metodologia de medição, indicadores de distorção harmônica e valores de referência. Os indicadores de distorção harmônica individual e total foram baseados nas recomendações internacionais do IEEE e IEC. (9)

3.2.1 Distorção Harmônica Individual (DIT_h)

A ANEEL, no módulo 8 do PRODIST (3), utiliza dois indicadores de referência para normatização das distorções harmônicas na rede elétrica. Um indicador é apresentado nessa seção, sendo a Distorção Harmônica Individual (DIT_h). O DIT_h é utilizado em sistemas de baixa, média e alta tensão. A equação 3.1 apresenta como é calculado o indicador individual de harmônica no sistema elétrico brasileiro.

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} * 100\ [\%] \tag{3.1}$$

Onde:

DIT_h - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h;

V_h - Tensão harmônica de ordem h;

V_1 - Tensão fundamental.

Diante do indicador individual, a ANEEL especifica no PRODIST os níveis de referência para as distorções harmônicas individuais de tensão. A tabela 6 mostra os valores de referência.

Tabela 6: Níveis de Referência para Distorções Harmônicas Individuais de Tensão (em percentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
		VN ≤ 1 kV	1 kV < VN ≤ 13,8 kV	13,8 kV < VN ≤ 69 kV	69 kV < VN ≤ 230 kV
Ímpares não múltiplos de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	19	2,5	2	1,5	1
	21	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	> 25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	> 21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	> 12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL, (2012).

3.2.2 Distorção Harmônica Total (DTT)

O indicador de distorção harmônica total é o indicador mais utilizado para quantificar as harmônicas, sendo adotado como principal parâmetro pelo IEEE (10) e pela

ANEEL (3). O DTT pode ser calculado para tensão ou corrente, porém a ANEEL utiliza somente o valor de tensão para cálculo do mesmo devido a maior confiabilidade. (9)(11)

Para o cálculo do indicador, é utilizado o valor RMS (*do inglês root mean square*), ou valor eficaz, de tensão. A DTT de tensão é dada por:

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h\ máx} {V_h}^2}}{V_1} * 100\ [\%] \tag{3.2}$$

Onde:

DTT - Distorção harmônica total de tensão;

V_h - Tensão harmônica de ordem h;

h_{max}- Ordem harmônica máxima;

V_1 - Tensão fundamental.

Devido à equação 3.2 ser derivada de uma somatória infinita, a ANEEL, especifica para o cálculo de distorção harmônica total, uma faixa de frequência que deva compreender da componente fundamental até, no mínimo a 25ª ordem harmônica. O IEEE recomenda para cálculo do DTT uma faixa de frequência da componente fundamental até a 50ª ordem. (5)

O módulo 8 do PRODIST apresenta os valores de referência para as distorções harmônicas totais, apresentadas na tabela 7. Porém estes valores não servem como parâmetro para possíveis compensações aos consumidores; servem apenas para referência no planejamento elétrico em termos de qualidade de energia elétrica.

Tabela 7: Valores de Referências Globais da DTT (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_V) [%]
VN ≤ 1 kV	10
1 kV < VN ≤ 13,8 kV	8
13,8 kV < VN ≤ 69 kV	6
69 kV < VN ≤ 230 kV	3

Fonte: ANEEL, (2012).

3.3 Equipamentos Geradores de Harmônicas

Durante muito tempo, as distorções harmônicas eram associadas somente às operações de máquinas elétricas ou transformadores de potência. Realmente, por tempo as principais fontes de distorções harmônicas eram as correntes de magnetização dos transformadores e os geradores elétricos. Porém, transformadores, geradores e motores elétricos, em regime permanente, não causam distorções significativas na forma de onda da tensão na rede elétrica, seus principais efeitos são durante o transitório ou quando operam fora das condições normais. Assim, por anos teve-se a negligência sobre os efeitos das harmônicas no sistema elétrico. (12)

Os estudos das harmônicas na rede elétrica surgiram com a evolução e difusão de equipamentos baseados na eletrônica de potência. Com o passar dos anos, a utilização de cargas não lineares foi cada vez mais frequente, consequentemente, teve-se um aumento na quantidade de cargas fontes de correntes harmônicas. Os equipamentos com características não lineares, por exemplo, televisores, computadores, inversores de frequência, soft-starters, lâmpadas fluorescentes, dentre outros equipamentos, possibilitaram uma melhoria considerável na qualidade de vida e na eficiência energética, porém em alguns casos piorando a qualidade da energia elétrica. O quadro 1 mostra alguns exemplos de DTT para cargas residenciais típicas.

Quadro 1: DTT_i de Algumas Cargas Residenciais e Comerciais

Equipamento	DTT_i (%)
Torradeira	2
Cafeteira	2
Lâmpadas fluorescentes (tipo reator)	36
Telefone sem fio	40
Forno de micro-ondas	46
Carregador de bateria	83
Aparelho de som com CD	104
Fonte de computador	111

Fonte: LUCAN, (2013).

Observando o quadro 1, percebe-se que equipamentos resistivos (torradeiras, cafeteiras) são pequenas fontes de distorção harmônica, em compensação equipamentos como carregador de bateria e fontes de computadores (cargas não lineares) são grandes fontes de poluições harmônicas nas cargas domésticas.

Tratando de maneira geral, as principais fontes de harmônicas são os conversores estáticos de potência, lâmpadas fluorescentes, fornos elétricos a arco, inversores de potência. (11)

A presença de harmônicas nos sistemas de potência provocam diversos efeitos indesejáveis, por exemplo, aquecimentos de máquinas elétricas, interferência na operação de equipamentos de controle e nas comunicações, entre outros. As harmônicas geram problemas para toda a rede elétrica, afetam cargas distantes das fontes poluidoras devido à ocorrência de ressonância, que dependem da configuração do sistema elétrico (9). O quadro 2 apresenta um resumo dos efeitos causados por distorções harmônicas em alguns equipamentos. A última coluna do quadro representa o grau de imunidade do equipamento, sendo um nível máximo que o equipamento possa ser afetado por harmônicas sem que ocorra degradação do mesmo.

Quadro 2: Efeitos das Distorções Harmônicas

Equipamento	Natureza do dano devido às tensões harmônicas	Grau de imunidade (nível de tensão admissível)
Máquinas Síncronas projetadas para operação senoidal	• Maior nível de aquecimento principalmente nos enrolamentos amortecedores • Torques pulsantes	$\sqrt{\sum\left(\frac{V_h}{h}\right)^2}$ $\leq 1{,}3\ a\ 2{,}4\%$ De acordo com a impedância e tamanho da máquina
Transformadores	• Maior nível de perdas • Risco de Saturação na presença de harmônicas pares	$\sqrt{\sum {V_h}^2} \leq 5\%$ Carga plena, e 10% a vazio
Máquinas Assíncronas	• Maior nível de aquecimento particularmente nas gaiolas duplas ou nas ranhuras profundas	$\sqrt{\sum\left(\frac{V_h}{h}\right)^2}$ $\leq 1{,}5\ a\ 3{,}5\%$ De acordo com a impedância inversa e tamanho da máquina
Cabos	• Maiores perdas ôhmicas	$\sqrt{\sum {V_h}^2} \leq 10\%$
Computadores	• Problemas Operacionais	$\sqrt{\sum {V_h}^2} \leq 5\%$
Capacitores de potência	• Maior nível de aquecimento • Perda de vida útil	$\sqrt{\sum h{V_h}^2} \leq 44\%$
Pontes Retificadoras	• Problemas ligados à forma de onda (comutação e sincronismo)	$\sqrt{\sum {V_h}^2} \leq 10\%$

Fonte: LUCAN, (2013).

3.4 Simulação

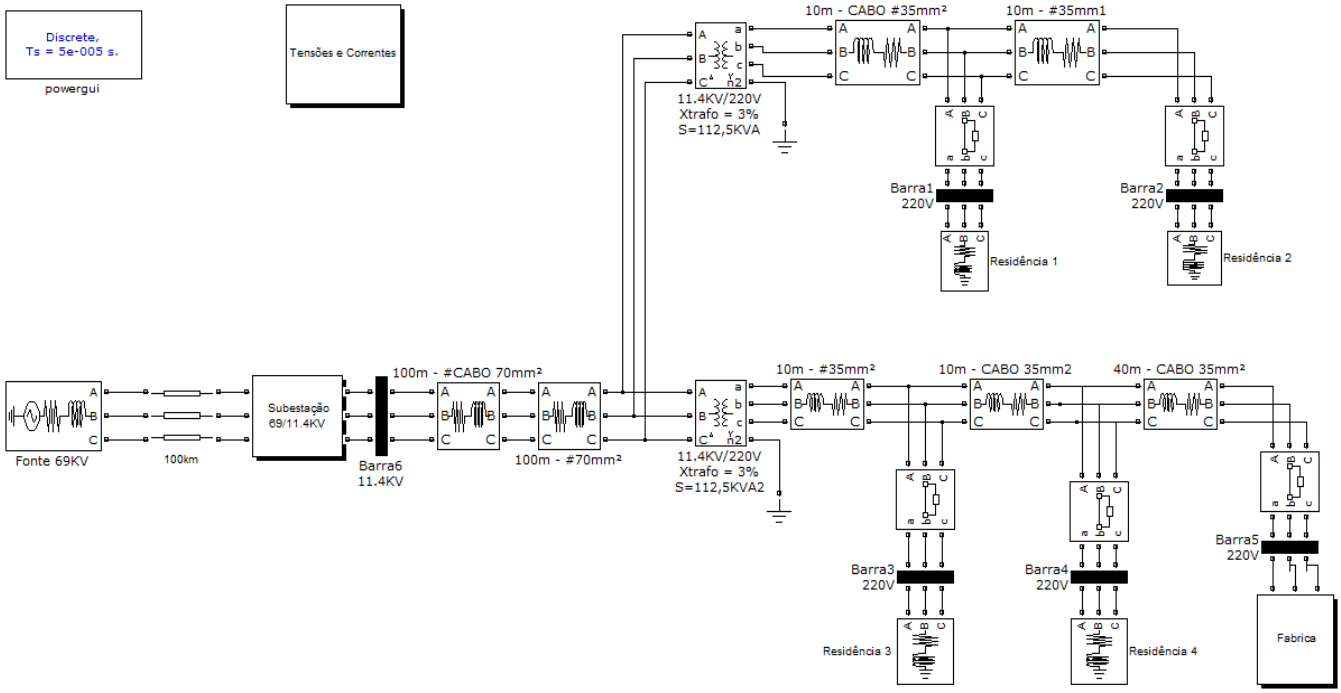
Esta etapa irá demonstrar os efeitos das harmônicas no sistema de distribuição de energia elétrica gerados pela presença de uma carga não linear de alta potência instalada em uma fábrica. A plataforma de simulação foi desenvolvida no ambiente simulink do software Matlab conforme descrito na seção 1.3 deste projeto.

O sistema elétrico é composto por um sistema de transmissão de energia de 69 kV_{rms} alimentando uma subestação abaixadora de 69 kV_{rms} para 11,4 kV_{rms}. A distribuição de energia elétrica é provida pela subestação abaixadora e ocorre na tensão de 11,4 kV_{rms} alimentando dois ramais de energia elétrica.

O primeiro ramal possui um transformador com potência nominal de 112,5 kVA, tensão de fase primária de 11,4 kV_{rms}, tensão de fase secundária de 220 V_{rms} e configuração delta-estrela aterrada. O transformador do primeiro ramal alimenta três cargas trifásicas na tensão de 220 V_{rms}, sendo duas cargas residenciais com potências nominais de 30 kVA e uma fábrica com potência nominal de 40 kW.

O segundo ramal possui um transformador com potência nominal de 112,5 kVA, tensão de fase primária de 11,4 kV_{rms}, tensão de fase secundária de 220 V_{rms} e configuração delta-estrela aterrada. O secundo ramal possui duas cargas trifásicas equilibradas de 30 kVA simbolizando duas residências típicas do sistema elétrico. A figura 11 mostra o sistema elétrico utilizado no simulador deste projeto. Os dados elétricos do sistema estão descritos na tabela 8.

Figura 11: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Harmônica



Fonte: Próprio autor.

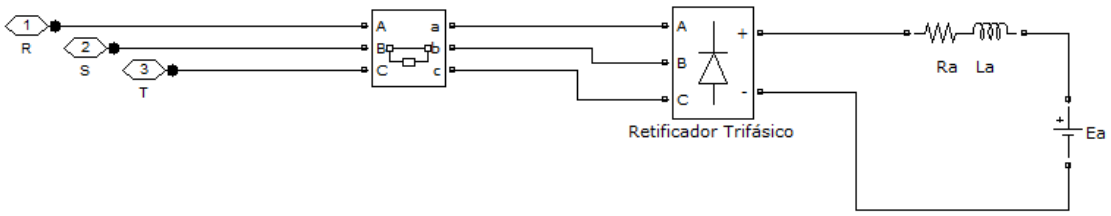
Tabela 8: Parâmetros do Simulador para Estudo de Harmônica

	Bloco	Parâmetros
TRANSMISSÃO	Fonte 69 kV	Vrms=69 kV; X/R = 1,84026
	LT 100 km	Distância=100Km; R1=0,01273 Ω/Km; R0=0,3864Ω/Km; L1=0,9337mH/Km; L2=4.1264mH/Km; C1=12.74nF/Km; C2=7,751nF/Km
	Subestação	Transformador 500kVA; Zt=9,31%; 69kV:11,4kV
DISTRIBUIÇÃO	Cabo 35mm²	R=0,87211 Ω/Km; L=0,34140 Ω/Km
	Cabo 70mm²	R=0,5694 Ω/Km; L=0,0727 Ω/Km
	Residências	Carga: 220Vrms; P= 28,5kW; Q=9,367kVAr
	Fábrica Baixa Tensão	Motor CC: Ra=2,5mΩ;La=13,692µH;Ea=265V

Fonte: Próprio autor.

Para efeito de simulação e visualização da presença de harmônicas no sistema elétrico, foram realizadas simplificações na planta da fábrica, na qual a mesma possui basicamente um motor elétrico de corrente contínua de alta potência. A figura 12 mostra a representação simplificada da fábrica.

Figura 12: Representação Simplificada de uma Indústria com Carga não Linear



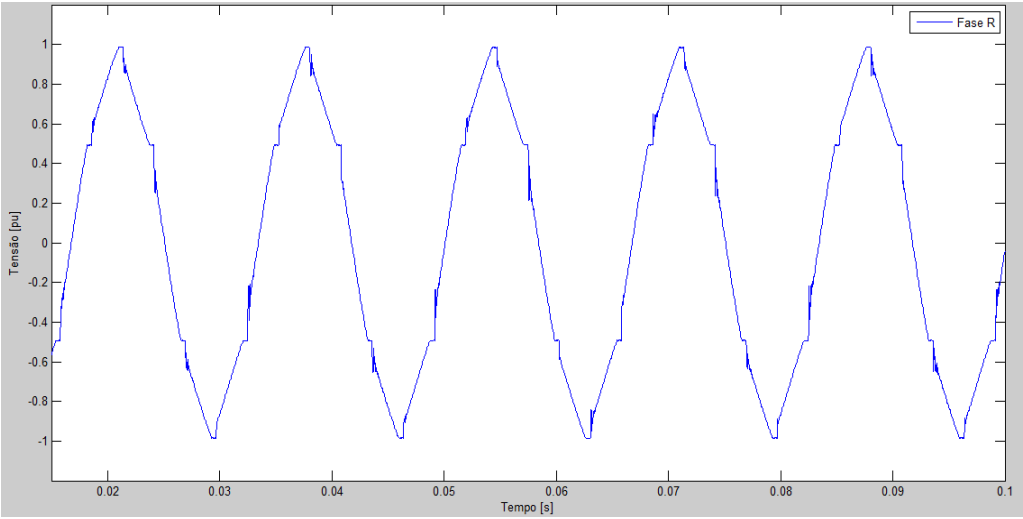
Fonte: Próprio autor

Na planta representada na figura 12 vemos a presença de um retificador trifásico que alimenta um motor de corrente contínua muito comum nas indústrias devido a sua alta gama de utilização. O retificador de onda completa é alimentado por uma tensão trifásica senoidal 220 V_{rms} tendo na sua saída uma tensão contínua (CC) de 300 V_{CC}. O motor DC de 40 kW é representado pela resistência de armadura (R_a), Indutância de armadura (L_a) e pela tensão de armadura (E_a).

O funcionamento do motor CC descrito acima, ou de outras cargas não lineares podem gerar diversos problemas para o sistema elétrico e equipamentos conectados

na rede. Um grande problema que estes equipamentos geram para a rede são as harmônicas conforme descritos no presente capítulo. Durante o funcionamento do motor CC, pode-se ver a presença de harmônicas na rede elétrica tanto no barramento da fábrica, quanto em outros barramentos vizinhos. A figura 13 mostra a forma de onda da tensão da fase R no barramento de entrada da fábrica. Por simetria da rede, as tensões das fases S e T foram ocultadas para melhor visualização do efeito de harmônicas. Na figura 13 foi adotada a tensão de base de 127 V_{rms} (fase-neutro).

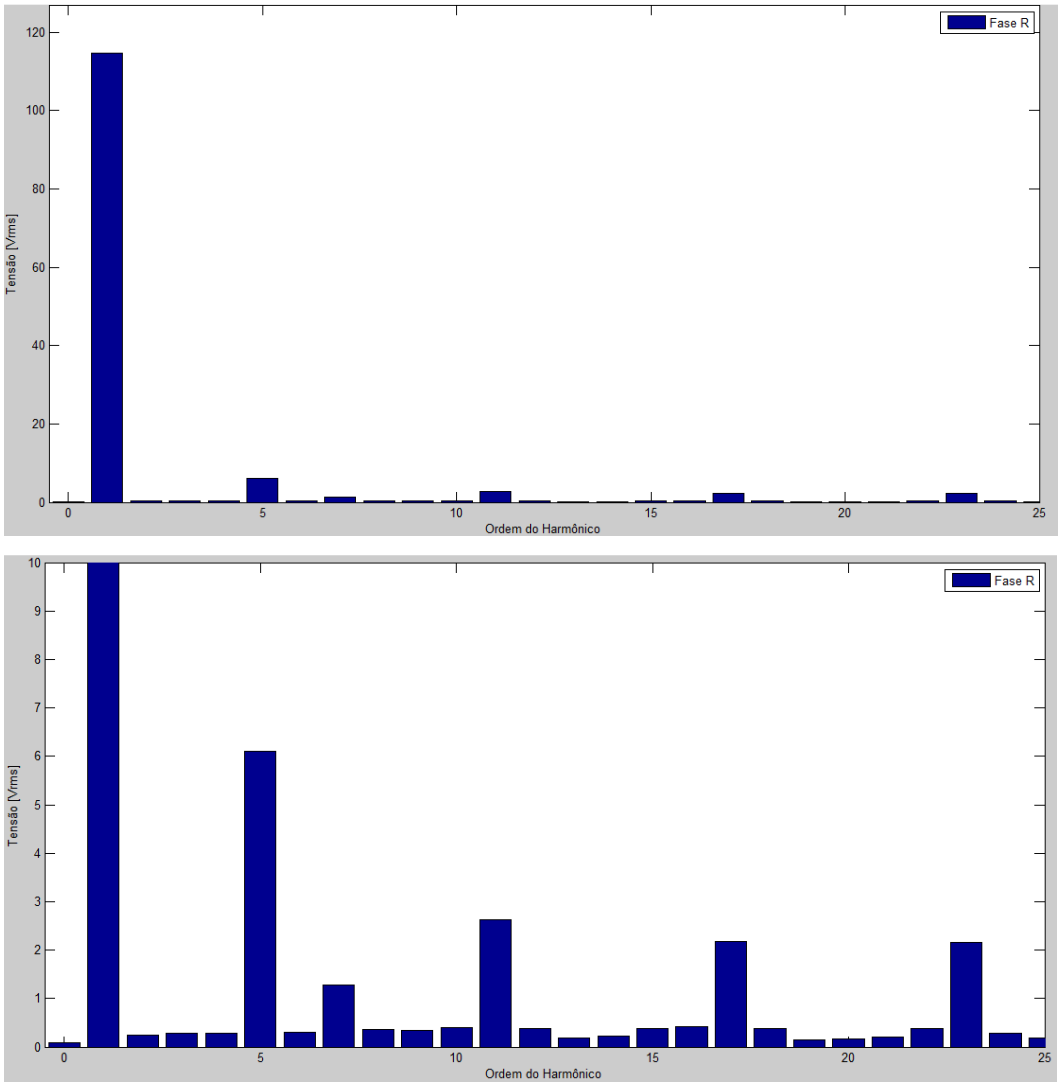
Figura 13: Tensão no Barramento de Entrada da Fábrica



Fonte: Próprio autor.

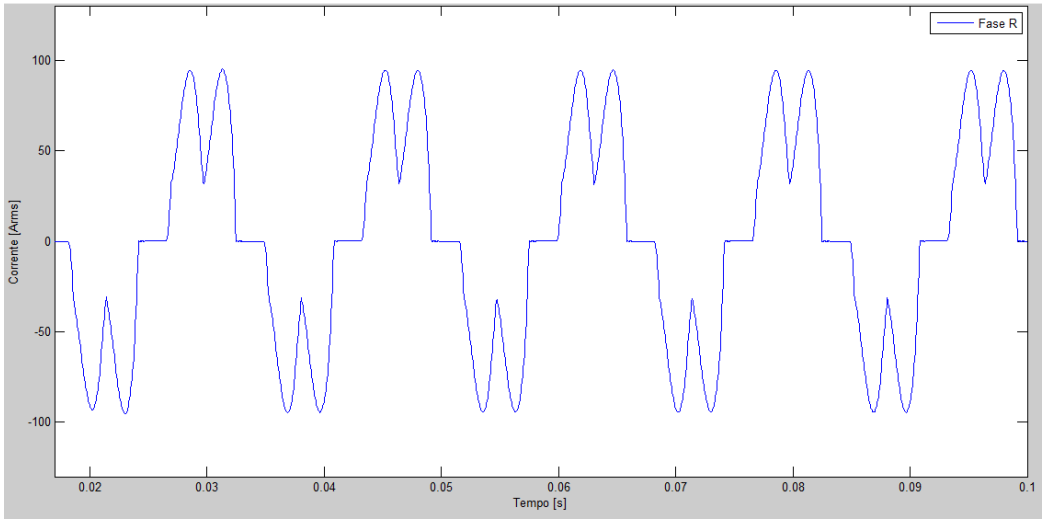
Nota-se a grande presença de harmônicas no barramento de entrada da fábrica, deixando a onda senoidal em uma forma triangular. As presenças de harmônicas são comprovadas pela figura 14 onde se pode ver o espectro da tensão da fase R. Vê-se a grande presença das harmônicas ímpares (5°, 7°, 11°, 13°, 19°). A figura 15 mostra a distorção da corrente de entrada da fábrica devido ao funcionamento do retificador trifásico de onda completa da fábrica.

Figura 14: Espectro da Tensão no Barramento de Entrada da Fábrica



Fonte: Próprio autor

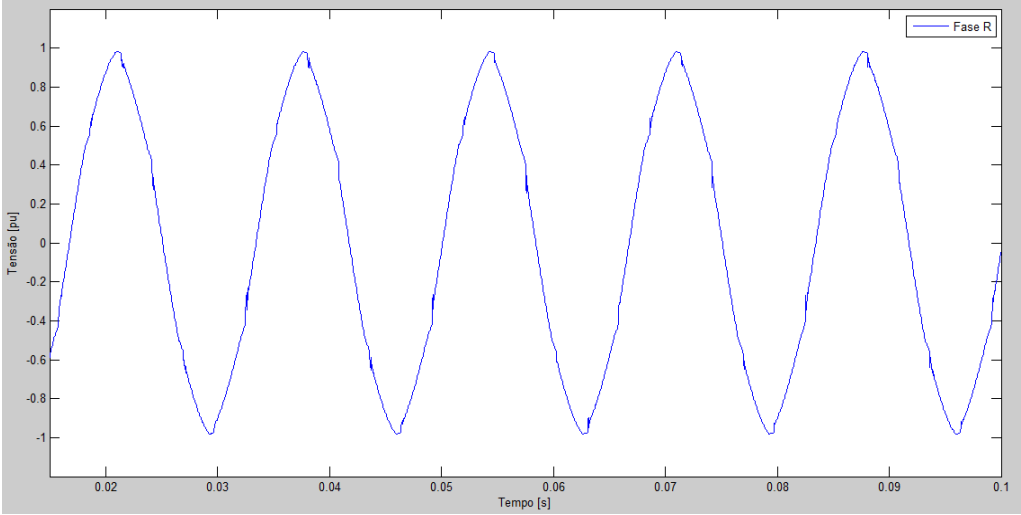
Figura 15: Corrente no Barramento de Entrada da fábrica



Fonte: Próprio autor.

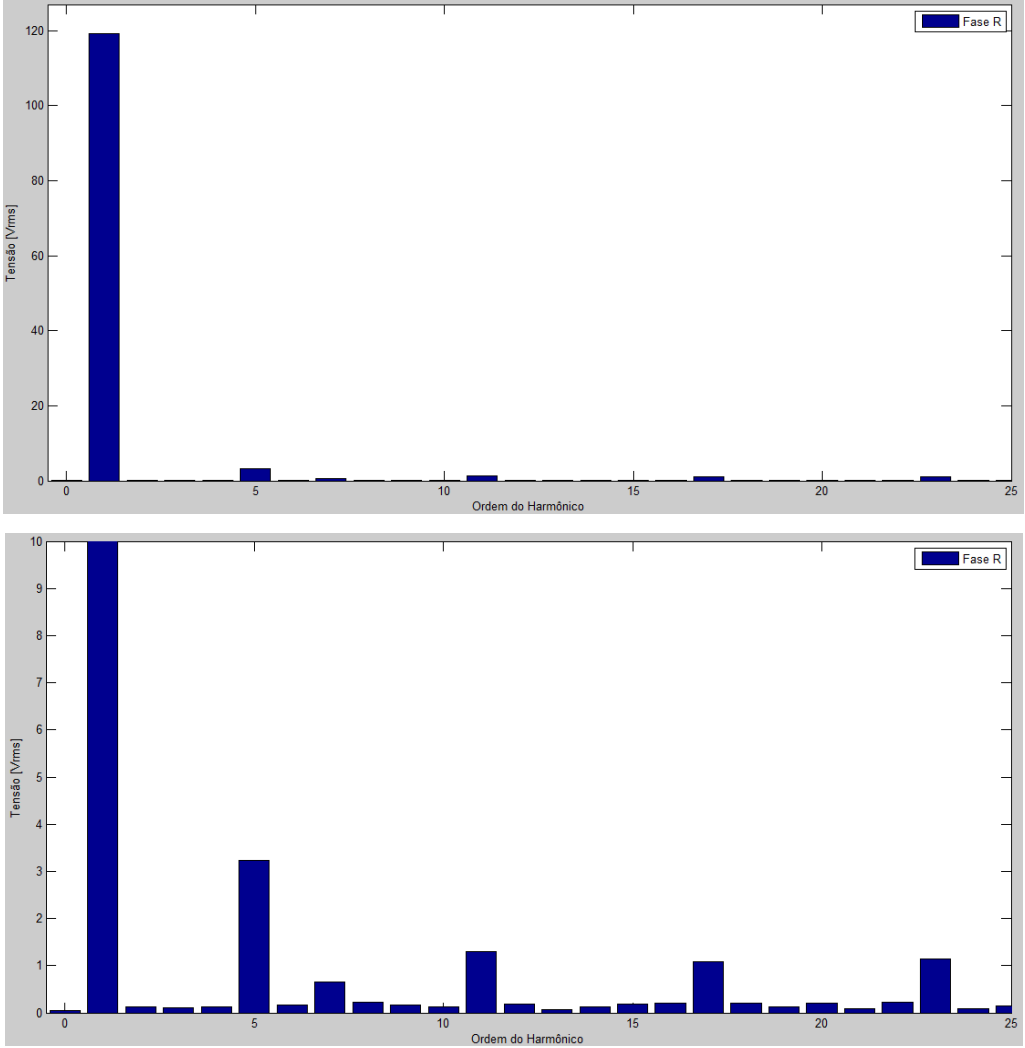
Para visualização da presença de harmônicas na rede elétrica devido ao funcionamento de um motor CC, as figuras 16, 17 e 18 mostram a tensão, o espectro da tensão e a corrente no barramento de entrada da residência 3 estando a mesma a uma distância de 50 metros da fonte harmônica.

Figura 16: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 3



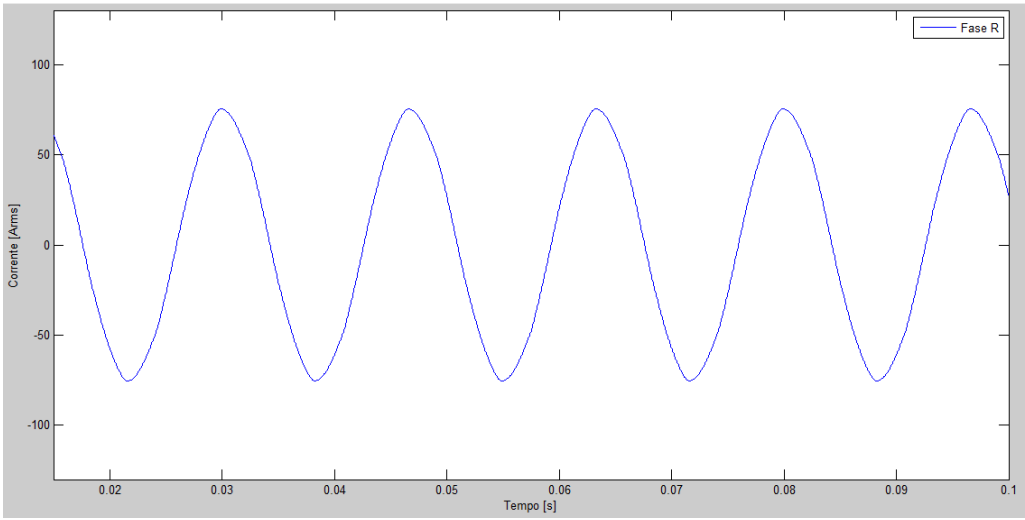
Fonte: Próprio autor.

Figura 17: Espectro da Tensão no Barramento de Entrada da Residência 3



Fonte: Próprio autor.

Figura 18: Corrente de Entrada da Residência 3



Fonte: Próprio autor

Conforme visto, à medida que nos distanciamos da fábrica, a presença de harmônicas na rede elétrica tende a diminuir, porém vê-se a propagação na rede mesmo que em valores pequenos. A tabela 9 mostra os níveis de harmônicas presentes nos principais barramentos do sistema. A partir da tabela 9, utilizando as equações (3.1) e (3.2) foram calculados os níveis de distorções harmônicas individuais e totais, sendo apresentados pelas tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 9: Níveis de Harmônicas nos Barramentos

	Residência 1	**Residência 2**	**Residência 3**	**Residência 4**	**Fábrica**
Harmônica	**Fase R [Vrms]**	**Fase R [Vrms]**	**Fase R [Vrms]**	**Fase R [Vrms]**	**Fase R [Vrms]**
1	120,62	119,92	119,33	117,86	114,73
2	0,10	0,10	0,12	0,14	0,24
3	0,07	0,07	0,11	0,14	0,29
4	0,11	0,11	0,14	0,17	0,29
5	2,62	2,60	3,24	3,79	6,10
6	0,13	0,13	0,16	0,19	0,31
7	0,53	0,53	0,66	0,78	1,28
8	0,20	0,20	0,22	0,25	0,36
9	0,13	0,13	0,17	0,20	0,33
10	0,14	0,14	0,13	0,16	0,39
11	1,03	1,02	1,30	1,56	2,63
12	0,15	0,15	0,19	0,22	0,37
13	0,03	0,03	0,07	0,09	0,18
14	0,11	0,11	0,13	0,15	0,22
15	0,15	0,15	0,19	0,23	0,39
16	0,15	0,15	0,20	0,24	0,43
17	0,85	0,85	1,08	1,29	2,17
18	0,17	0,17	0,20	0,23	0,38
19	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14
20	0,22	0,21	0,20	0,19	0,16
21	0,06	0,06	0,08	0,10	0,21
22	0,20	0,20	0,22	0,25	0,38
23	0,93	0,92	1,14	1,33	2,17
24	0,05	0,05	0,09	0,13	0,29
25	0,14	0,14	0,15	0,16	0,19

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10: Distorções Harmônicas Individuais nos Barramentos

	Residência 1	Residência 2	Residência 3	Residência 4	Fábrica
Harmônica	**Fase R [DITh]**	**Fase R [DITh]**	**Fase R [DITh]**	**Fase R [DITh]**	**Fase R [DITh]**
2	0%	0%	0%	0%	0%
3	0%	0%	0%	0%	0%
4	0%	0%	0%	0%	0%
5	2%	2%	3%	3%	5%
6	0%	0%	0%	0%	0%
7	0%	0%	1%	1%	1%
8	0%	0%	0%	0%	0%
9	0%	0%	0%	0%	0%
10	0%	0%	0%	0%	0%
11	1%	1%	1%	1%	2%
12	0%	0%	0%	0%	0%
13	0%	0%	0%	0%	0%
14	0%	0%	0%	0%	0%
15	0%	0%	0%	0%	0%
16	0%	0%	0%	0%	0%
17	1%	1%	1%	1%	2%
18	0%	0%	0%	0%	0%
19	0%	0%	0%	0%	0%
20	0%	0%	0%	0%	0%
21	0%	0%	0%	0%	0%
22	0%	0%	0%	0%	0%
23	1%	1%	1%	1%	2%
24	0%	0%	0%	0%	0%
25	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Próprio autor

Tabela 11: Distorção Harmônica Total nos Barramentos

	Residência 1	Residência 2	Residência 3	Residência 4	Fábrica
	Fase R	**Fase R**	**Fase R**	**Fase R**	**Fase R**
DTT	3%	3%	3%	4%	7%

Fonte: Próprio autor

Observa-se pelas tabelas acima, que o motor CC funcionando em regime permanente não gera uma quantidade prejudicial de harmônicas na rede, no qual os barramentos da rede estão com os níveis de harmônicas abaixo dos limites normativos. Porém já se vê a influência de uma carga não linear no sistema e ao se pensar na quantidade de cargas não lineares em uma fábrica, percebe-se que esses valores podem se tornar altos suficientes para serem prejudiciais à rede de energia elétrica.

3.5 Conclusões Específicas

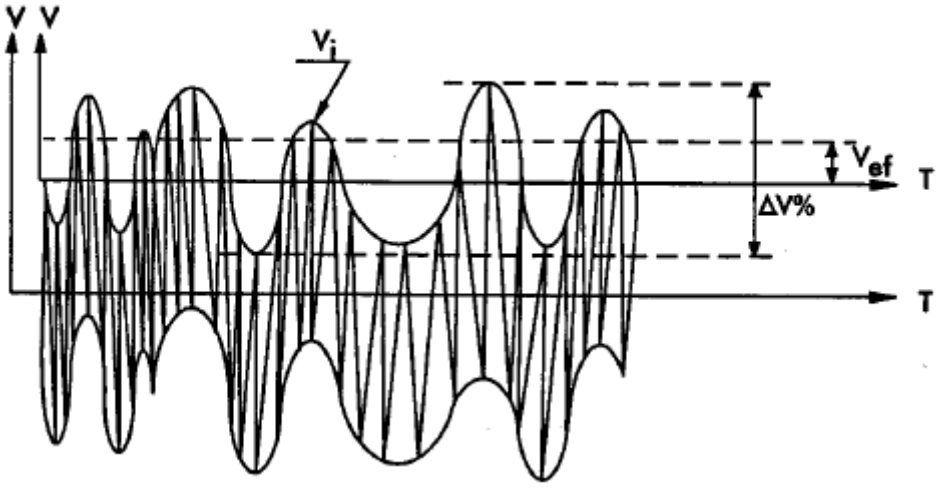
No capítulo presente, foram apresentados os principais indicadores harmônicos na rede elétrica, as principais normatizações no sistema elétrico brasileiro, os quais foram utilizados para estudos. Foram também expostas as características harmônicas e as principais fontes geradoras de harmônicas. A fim de normatização, foram destacadas as referências da norma IEEE e do módulo 8 do PRODIST principal fonte bibliográfica do projeto.

Apesar das consequências geradas por harmônicas no sistema de energia elétrica, as normatizações brasileiras ainda não punem as concessionárias ou consumidores de energia elétrica que geram tais efeitos na rede. Infelizmente os valores de referência servem apenas como valores para planejamento elétrico, com isso as indústrias, principais fontes de harmônicas, ainda não se preocupam com a poluição da rede elétrica afetando diversos consumidores da rede conforme visto na etapa de simulação que exemplificou a influência de cargas não lineares por todo o sistema elétrico.

4 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Flutuação de tensão é um distúrbio específico na rede elétrica, causando diversos problemas para usuários do sistema elétrico. A ANEEL define no PRODIST flutuação de tensão como: "*A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão*" (3). A figura 19 mostra o efeito de flutuação de tensão no sistema elétrico.

Figura 19: Flutuação de Tensão na Rede Elétrica



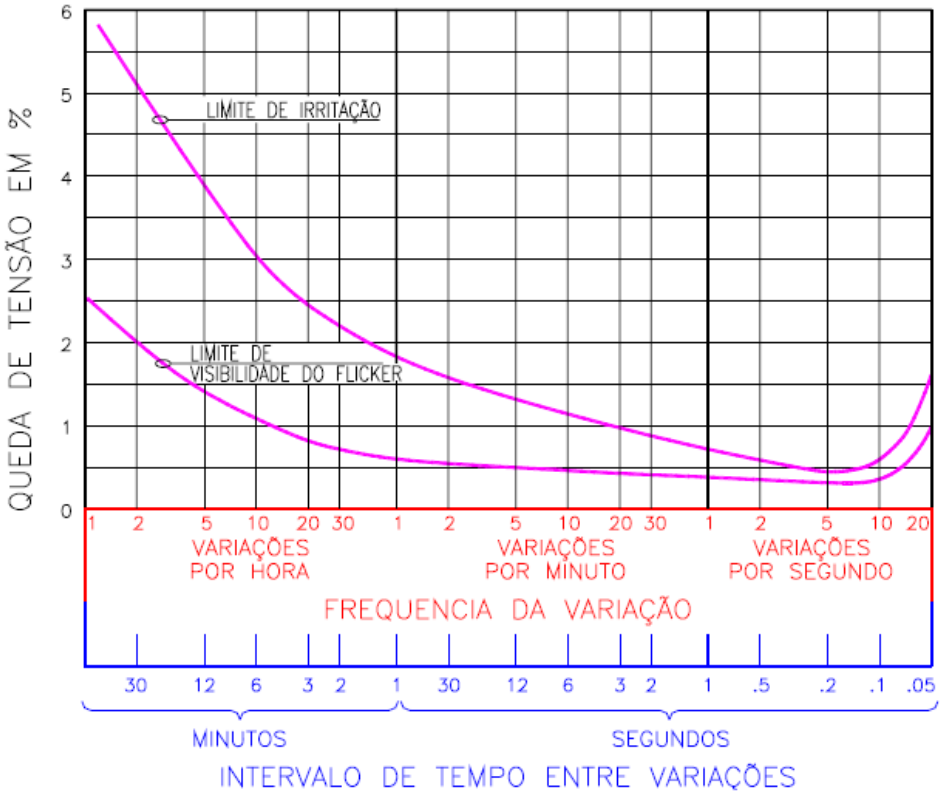
Fonte: MEHL, (2014).

As flutuações de tensão estão relacionadas como a maioria dos distúrbios da rede elétrica: o sistema elétrico é sensível para cargas de altas potências, ou seja, o sistema não consegue manter a tensão estável ao alimentar cargas de altas potências elétricas. Essas flutuações de tensão normalmente são originadas por variações bruscas de cargas elétricas especiais, tais como fornos a arco, sistemas de solda a arco, grandes conjuntos de injetoras/extrusoras, moedores de rocha, partidas de motores, turbinas eólicas e outras cargas eletro-intensivas. (7)(14)

A flutuação de tensão provoca o efeito de cintilação luminosa, tradução da palavra inglesa "Flicker". Flicker é um fenômeno constatado por meio da impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso nas lâmpadas elétricas, tendo um efeito mais severo nas lâmpadas incandescentes. O problema de flicker na rede elétrica já perdura por muitos anos, visto que nas décadas de 20 e 30 havia levantamentos sobre assunto. A figura 20 mostra um levantamento de estudo feito pela empresa

General Electric Company em 1925, onde diversos grupos de pessoas foram expostas a variação de tensão e por fim foram traçadas curvas características como limite de visibilidade do flicker e limite de irritação. (2)(15)

Figura 20: Visibilidade de Flicker em Lâmpadas Incandescentes

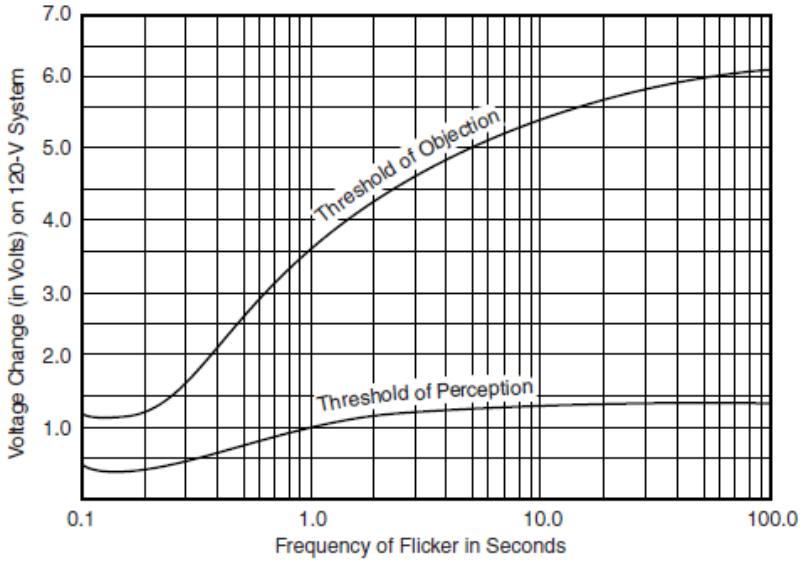


Fonte: CANDIDO, (2008).

Nessa curva, o eixo das abscissas indica o número de variações por período, e o eixo das ordenadas indica a queda de tensão. Como consequência, temos a curva limite de visibilidade do flicker, ou seja, o momento em que o fenômeno é perceptível ao olho humano, e a curva de limite de irritação, indicando o limite para danos no ser humano. Percebe-se quanto maior o número de variações por intervalo de tempo, menor a variação de tensão para a cintilação ser perceptível. O ponto mais crítico da curva é entre 8 a 10 variações por segundo, ou 8 a 10 Hz. A partir de 10 Hz a curva cresce exponencialmente. Percebe-se pelas curvas que o olho humano é mais sensível a flutuação luminosa para frequências entre 5 a 10 Hz, onde para frequência acima de 30 Hz o efeito não é mais perceptível ao olho humano.

De maneira análoga, a figura 21 mostra outro estudo realizado em 1937 pelos pesquisadores Xenis e Perine. (7)

Figura 21: Visibilidade de Flicker



Fonte: DUGAN, (2003).

Além de causar o efeito de flicker, a flutuação de tensão pode causar interferência em equipamentos sensíveis à variação de frequência, por exemplo, inversores de frequência, controladores lógicos programáveis (CLP), computadores, etc.

Assim como os outros efeitos perturbadores da qualidade de energia, a flutuação de tensão também possui suas definições de metodologia de medição, valores de referência e cálculo para averiguação da intensidade do efeito perturbador na rede elétrica. Todas as definições serão abordadas neste capítulo, sendo descritas no módulo 8 do PRODIST (3).

4.1 Indicadores de Flutuação de Tensão

Existem vários métodos para determinação da flutuação de tensão em um sistema de energia elétrica. Podem-se destacar o método francês apresentado pela “Electricité de France” (EDF), o método alemão (FGH), o método inglês apresentado pela “Electric Research Association” (ERA), o método americano da constante de queda de tensão mútua e o método padrão apresentado pela União Internacional de Eletrotermia (UIE). (16)(17)

Cada método de análise de flutuação de tensão apresenta uma particularidade no cálculo, porém podemos destacar alguns fundamentos comuns (17):

- Lâmpada incandescente é utilizada como referência para quantificação do flicker;
- Os procedimentos baseiam-se no princípio de modulação de sinais;
- O método britânico e o apresentado pela UIE utilizam teorias estatísticas considerando o caráter aleatório das flutuações de tensão;
- O método francês e o apresentado pela UIE valorizam as frequências críticas existentes no sinal modulante, causadoras de maior incômodo ao olho humano.

A ANEEL utiliza o método padrão desenvolvido pela União Internacional de Eletrotermia (UIE) para quantificar os níveis de flutuação de tensão no sistema elétrico brasileiro, assim o método será detalhado nas próximas seções.

4.1.1 Método Padrão UIE

O Método Padrão criado pela União Internacional de Eletrotermia foi idealizado com o objetivo de universalizar o critério de medição de flutuação de tensão no sistema elétrico. O método adotado por vários países do mundo, inclusive no Brasil pela ANEEL, reúne as principais vantagens do método francês e britânico, tornando-se assim mais flexível e abrangente. (17)

O método de análise de flicker considera a reação das pessoas quanto ao incômodo visual provocado pela flutuação de tensão. O método utiliza o medidor ou analisador de flicker desenvolvido pela UIE para quantificar o incômodo visual provocado pela flutuação de tensão em uma lâmpada de 60W-127V. (16)

Através das medições realizadas pelo analisador de flicker e pelos processamentos das tensões dos barramentos utilizando os procedimentos recomendados pela IEE 555-3 e pela IEC 61000-4-15, o Método Padrão obtém os níveis da flutuação de tensão através do cálculo dos indicadores P_{st} (Flutuação de tensão de severidade de curta duração) e P_{lt} (Flutuação de tensão de severidade de longa duração). (1)(3)(16)

O parâmetro P_{st} indica o nível de severidade de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada em um período de 10 minutos (3). A expressão para cálculo do P_{st} é dada pela equação 4.1:

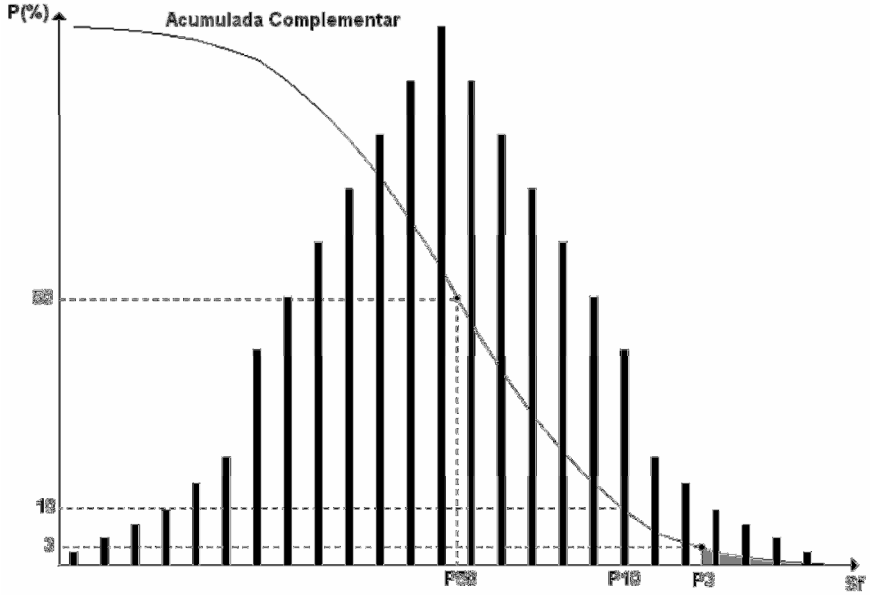
$$P_{st} = \sqrt{0{,}0314P_{0,1} + 0{,}0525P_1 + 0{,}0657P_3 + 0{,}28P_{10} + 0{,}08P_{50}} \quad (4.1)$$

Onde:

P_{st}- severidade de curta duração;

P_i (i = 0,1; 1; 3; 10; 50) corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante i% do tempo, sendo obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar de acordo com o procedimento estabelecido nas normas IEC 61000-4-15.

Figura 22: Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação



Fonte: ANEEL, (2012).

O parâmetro P_{lt} indica o nível de severidade de cintilação luminosa associado à flutuação de tensão verificada em um período de 2 horas, através da composição de 12 valores consecutivos de P_{st} (3). A expressão para cálculo do P_{lt} é dada na equação 4.2:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} * \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \tag{4.2}$$

Onde:

Pst_i: Pst de número “i” no cálculo do Plt;

4.2 Normatização

A ANEEL conforme dito utiliza o Método Padrão desenvolvido pela UIE para especificação do nível de flutuação de tensão num barramento de um sistema elétrico brasileiro.

Conforme a norma, as medições do parâmetro P_{st} descritas na seção 4.1.1, devem ser realizadas em um período de 24 horas e partir de um conjunto de valores P_{st}, que tratados estatisticamente, conduzirão ao $P_{st}D95\%$ que representa o valor diário do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 horas. Ao final de uma semana de medição, considera-se como indicador final o maior valor entre os 7 valores encontrados. (1)(3)

De maneira análoga, obtêm-se ao longo de uma semana um conjunto de medições do parâmetro $\mathrm{P_{lt}}$, que tratados estatisticamente, conduzirão ao $\mathrm{P_{lt}}S95\%$ que representa o valor semanal do indicador $\mathrm{P_{lt}}$ que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos. A tabela 12 fornece os valores de referência utilizados pela ANEEL descritos no PRODIST para avaliação do desempenho do sistema quanto às flutuações de tensão. (1)(3)

Tabela 12: Valores de Referência para a Flutuação de Tensão

Valor de referência	**PstD95%**	**PltD95%**
Adequado	< 1pu / FT	< 0,8pu / FT
Precário	1pu - 2pu / FT	0,8 - 1,6pu / FT
Crítico	> 2pu / FT	>1,6pu / FT

Fonte: ANEEL, (2012).

O termo FT, denominado de Fator de Transferência deve ser calculado pela relação entre o valor do PltS95% do barramento do sistema de distribuição e o valor do PltS95% do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição eletricamente mais próximo. A tabela 13 indica os valores de FT para os casos onde a tensão dos barramentos envolvidos não seja conhecida através de medições.

Tabela 13: Fatores de Transferência

Tensão Nominal do Barramento	FT
Tensão do barramento ≥ 230 kV	0,65
69 kV ≤ Tensão do barramento < 230 kV	0,8
Tensão do barramento < 230 kV	1,0

Fonte: ANEEL, (2012).

4.3 Equipamentos Geradores de Flutuações de Tensão

As flutuações de tensão são provocadas principalmente pelas cargas eletro-intensivas industriais devido a suas altas requisições de potência do sistema elétrico e suas variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente de carga.

As flutuações podem se manifestar de três formas diferentes (17):

- Flutuações aleatórias - onde as principais fontes de oscilações são os fornos a arco;
- Flutuações repetitivas – onde as principais fontes são as máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas, ferrovias, etc;
- Flutuações esporádicas – onde as principais fontes são as partidas diretas de motores de grandes potências.

Como vimos anteriormente, além de causar o efeito de flicker, a flutuação de tensão pode causar oscilações de potência, queda do rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos equipamentos de proteção, interferência em equipamentos sensíveis à variação de frequência, como por exemplo, inversores de frequência, controladores lógicos programáveis (CLP), computadores, etc. (17)

Dentro das cargas causadoras de flutuação de tensão, o presente capítulo trará uma análise detalhada do forno a arco devido aos seus maiores efeitos sobre o sistema de alimentação das concessionárias de energia elétrica, sendo o principal causador de flicker.

4.3.1 Fornos Elétricos

Com o desenvolvimento da indústria brasileira, os fornos elétricos fazem parte fundamental das plantas industriais devido a suas aplicações. Os fornos elétricos apresentam uma imensa preocupação para as concessionárias de energia elétrica, devido a suas altas solicitações de potência e pelas perturbações no sistema elétrico conforme mencionado no presente capítulo. (16)

Os fornos elétricos são divididos em três categorias distintas, sendo fornos a resistência elétrica, fornos de indução eletromagnética e fornos a arco. O forno a arco é o forno que mais provoca perturbações para o sistema elétrico. Devido a esta particularidade, o mesmo será detalhado no próximo item e foi utilizado no projeto de simulação do presente trabalho. (16)

4.3.1.1 Forno a Arco

Fornos a arco são fornos que utilizam a propriedade do arco elétrico para produzirem a fusão de metais, por exemplo, ferro, aço, cobre, latão, bronze e outras ligas metálicas sendo muito utilizado pelas indústrias siderúrgicas. (16)

Os fornos a arco surgiram no ano de 1904, criado pelo francês Hérould e hoje são divididos em três categorias, sendo fornos a arco submerso, arco indireto ou arco direto. Os fornos a arco submerso e arco indireto basicamente não apresentam distúrbios no sistema elétrico, diferente do forno a arco direto que devido ao seu funcionamento e a alta potência pode causar grandes perturbações para o sistema causando, por exemplo, flicker, afundamento de tensão, harmônicas e outros distúrbios mencionados anteriormente. A tabela 14 mostra as potências típicas dos fornos a arco direto em função da capacidade de fusão de aço e ferro fundido. (16)

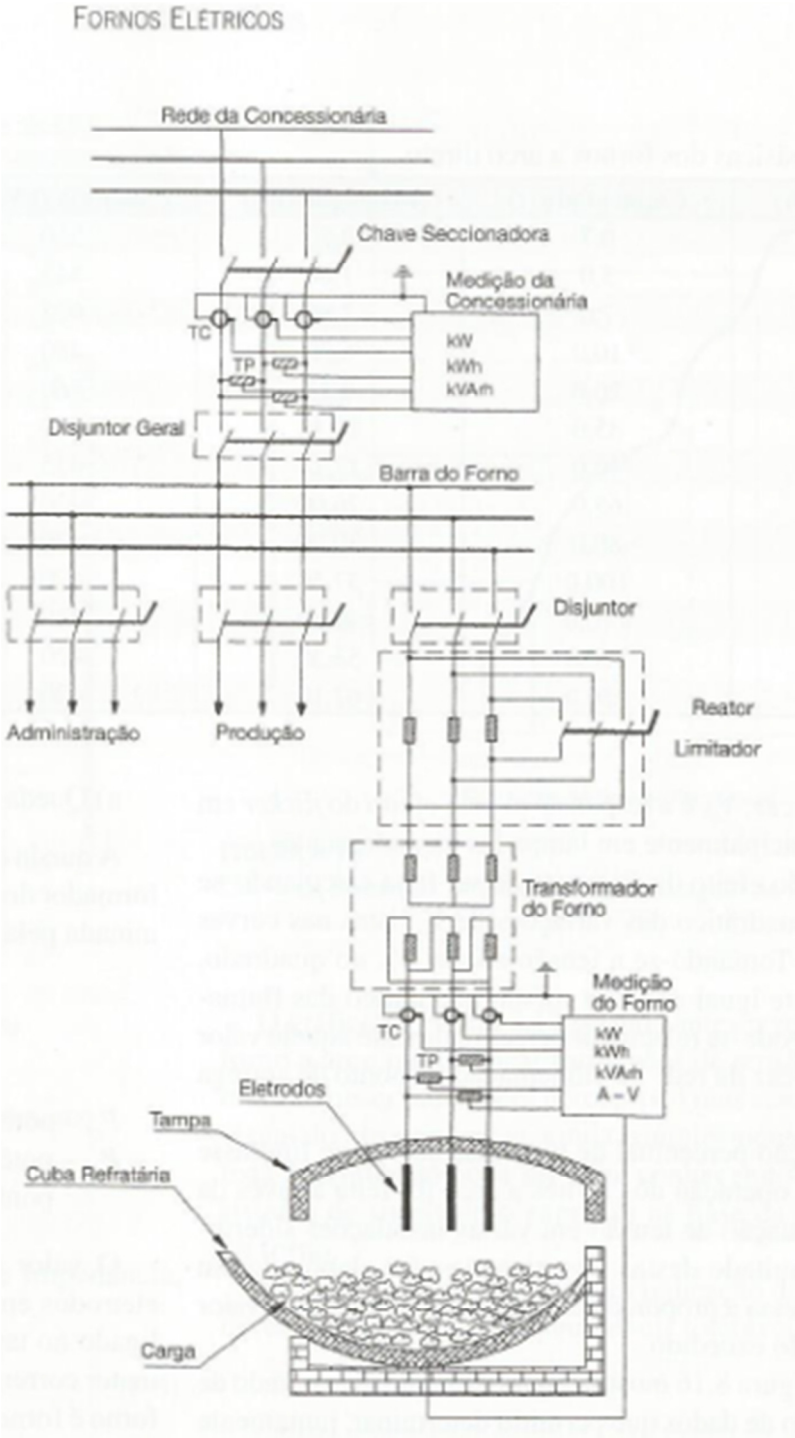
Tabela 14: Características básicas dos fornos a arco direto

Potência (kVA)	Capacidade (t)	Produção (t/h)	Consumo (kWh/t)
600	0,7	0,70	550
1.500	3,0	1,80	545
3.000	7,0	2,80	625
5.000	10,0	6,30	480
7.000	20,0	9,23	460
10.000	35,0	14,48	440
12.500	40,0	17,14	435
17.500	65,0	26,00	420
20.000	80,0	30,00	420
25.000	100,0	37,50	420
31.500	110,0	49,80	440
35.000	120,0	53,30	420
40.000	150,0	62,10	420

Fonte: MAMEDE, (2010).

Fornos a arco direto geralmente são trifásicos, sendo constituídos basicamente por uma cuba de material refratário, no qual operam eletrodos posicionados na vertical. O princípio de funcionamento deste forno se baseia na formação de arco entre os eletrodos e a carga. O forno trabalha basicamente em dois ciclos de trabalho, o primeiro denominado de fusão sendo caracterizado pelo constante movimento da carga sólida. Nesta etapa do processo, pedaços de metal formam pontes entre os eletrodos de diferentes fases, resultado altas potências reativas de curto-circuito no secundário do transformador alimentador do forno. Neste período ocorrem cerca de 600 a 1000 curtos-circuitos, durando aproximadamente 50 minutos o processo de fusão. O segundo ciclo, caracterizado de refino, possui a melhor estabilidade do arco elétrico, devido a carga se encontrar no estado líquido. A figura 23 mostra o diagrama trifilar característico de um forno a arco direto. (7)(16)

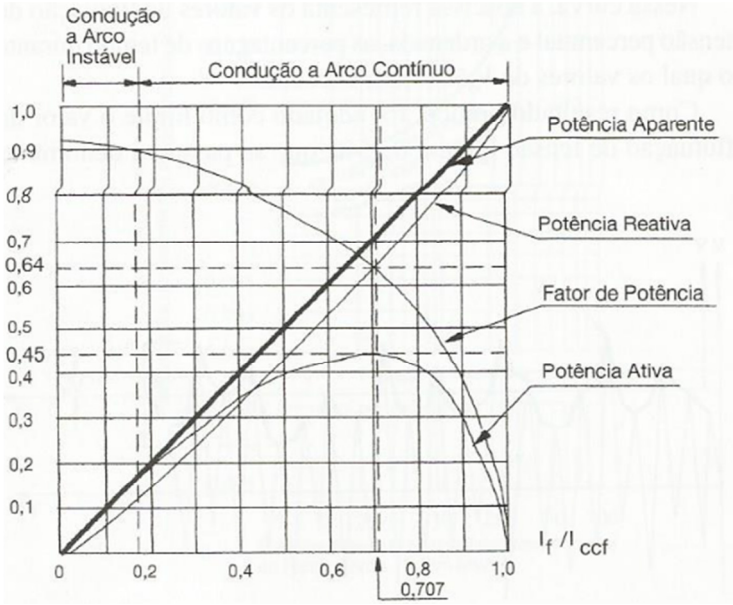
Figura 23: Diagrama Trifilar Simplificado de uma Instalação com Forno a Arco Direto



Fonte: MAMEDE, (2010).

O gráfico 1 mostra as características elétricas de uma fase de um forno, em função da relação da corrente de carga (I_f) em um determinado período e a corrente de curto-circuito do forno elétrico (I_{CCf}).

Gráfico 1: Características de operação de um forno a arco direto trifásico



Fonte: MAMEDE, (2010).

Pela figura acima percebe-se que à medida que a corrente de carga (I_f) aumenta, o fator de potência diminui, podendo chegar a zero quando I_f tem a mesma magnitude da corrente de curto-circuito do forno I_{CCf}. A potência ativa tem o ápice para a relação de $\frac{I_f}{I_{CCf}}$ =0,707, decrescendo exponencialmente à medida que I_f aumenta. Em compensação a potência reativa aumenta de forma exponencial quando I_f cresce.

Devido às características de trabalho detalhadas no capítulo, o funcionamento de forno a arco direto resulta geralmente numa flutuação de tensão na faixa de frequência entre 1 a 10 Hz, sendo mais agravante ao olho humano. Com isso, fornos a arco são grandes problemas para as concessionárias de energia elétrica, causando diversas perturbações para as instalações elétricas. (7)

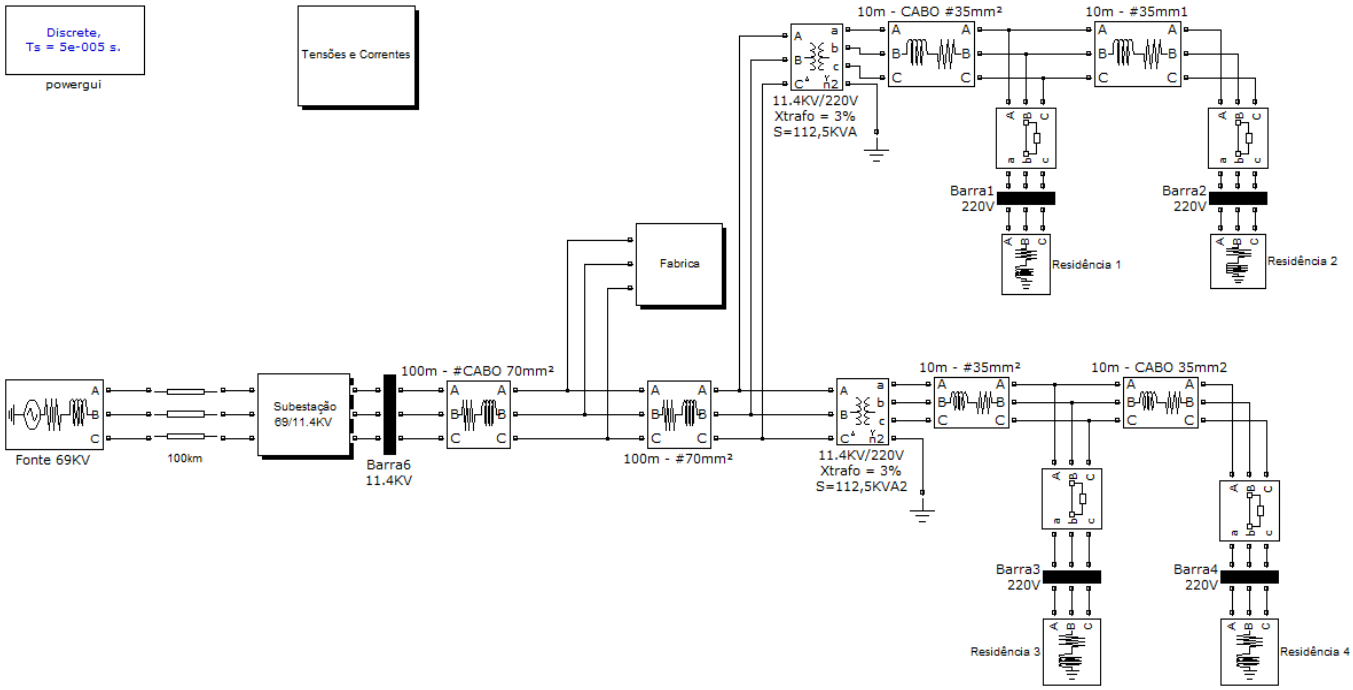
O presente capítulo demostrará o efeito de um forno a arco direto em um sistema elétrico de potência, mostrando as principais consequências para consumidores ligados à linha de distribuição.

4.4 Simulação

Esta etapa irá demonstrar o efeito de flutuação de tensão no sistema de distribuição de energia elétrica. A plataforma de simulação foi desenvolvida no ambiente simulink do software Matlab conforme descrito no capítulo 1.3 deste projeto.

O sistema de distribuição conta com um sistema de 69 kV de transmissão de energia alimentando uma subestação distribuidora de 69 kV para 11,4 kV. A distribuição ocorre na tensão de 11,4 kV alimentando três ramais de energia elétrica. O primeiro ramal alimenta uma fábrica na tensão primária de 11,4 kV, o segundo e terceiro ramais alimentam cargas residenciais de 30 kVA na tensão de 220 V_{rms} fase-fase.

Figura 24: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Flutuação de Tensão

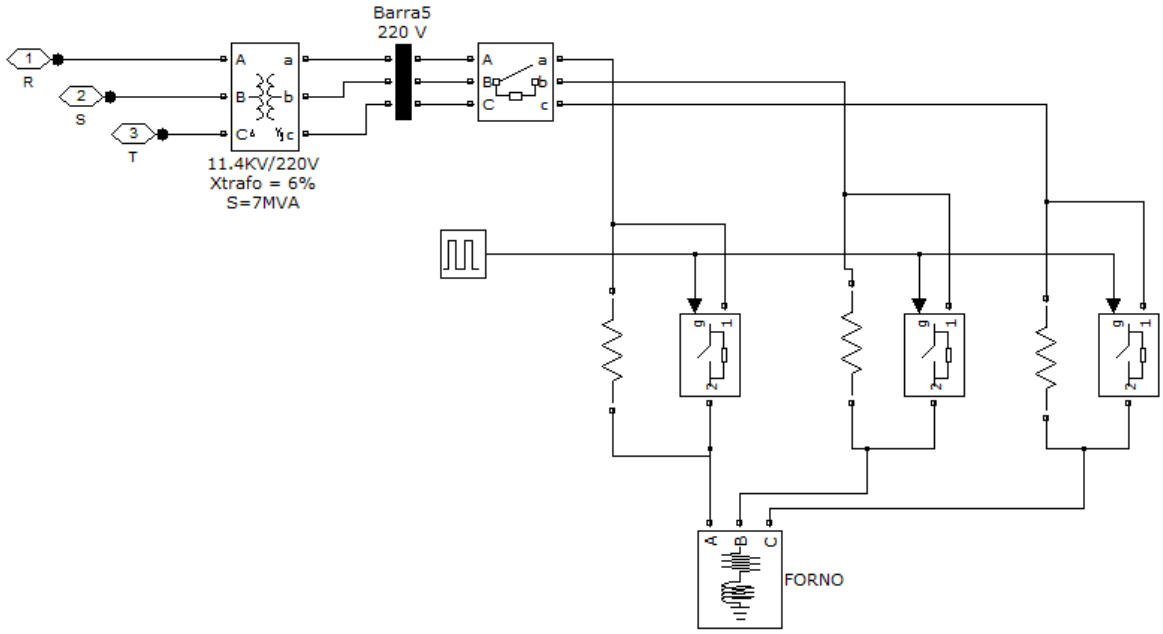


Fonte: Próprio autor.

A fabrica é alimentada a partir da tensão primária de 11,4 kV tendo na mesma um transformador de entrada de 7 MVA 11,4 – 0,22 kV com ligação primária em estrela e secundária em delta destinado para a carga trifásica. A carga trifásica simboliza um forno a arco direto com potência nominal de 5 MW representando o momento de fusão, ponto mais crítico de trabalho do forno. Como o objetivo é a visualização da flutuação de tensão, foram realizadas algumas simplificações para velocidade de

simulação. A figura 25 mostra a representação simplificada da fábrica. A figura 24 mostra o sistema elétrico utilizado para estudo de flutuação de tensão. Os dados elétricos do sistema estão descritos na tabela 15.

Figura 25: Representação de um Forno a Arco Direto em uma Indústria



Fonte: Próprio autor.

Tabela 15: Parâmetros do Simulador para Estudo de Flutuação de Tensão

	Bloco	Parâmetros
TRANSMISSÃO	Fonte 69 kV	Vrms=69 kV; X/R = 1,84026
	LT 100 km	Distância=100Km; R1=0,01273 Ω/Km; R0=0,3864Ω/Km; L1=0,9337mH/Km; L2=4.1264mH/Km; C1=12.74nF/Km; C2=7,751nF/Km
	Subestação	Transformador 10MVA; Zt=7%; 69kV:11,4kV
DISTRIBUIÇÃO	Cabo 35mm²	R=0,87211 Ω/Km; L=0,34140 Ω/Km
	Cabo 70mm²	R=0,5694 Ω/Km; L=0,0727 Ω/Km
	Residências	Carga: 220Vrms; P= 29,4kW; Q=5,969kVAr
	Fábrica Média Tensão	Transformador 7MVA; Zt=6%; 11.4kV:220V Carga: 220Vrms; P=5MW; fp=0,68

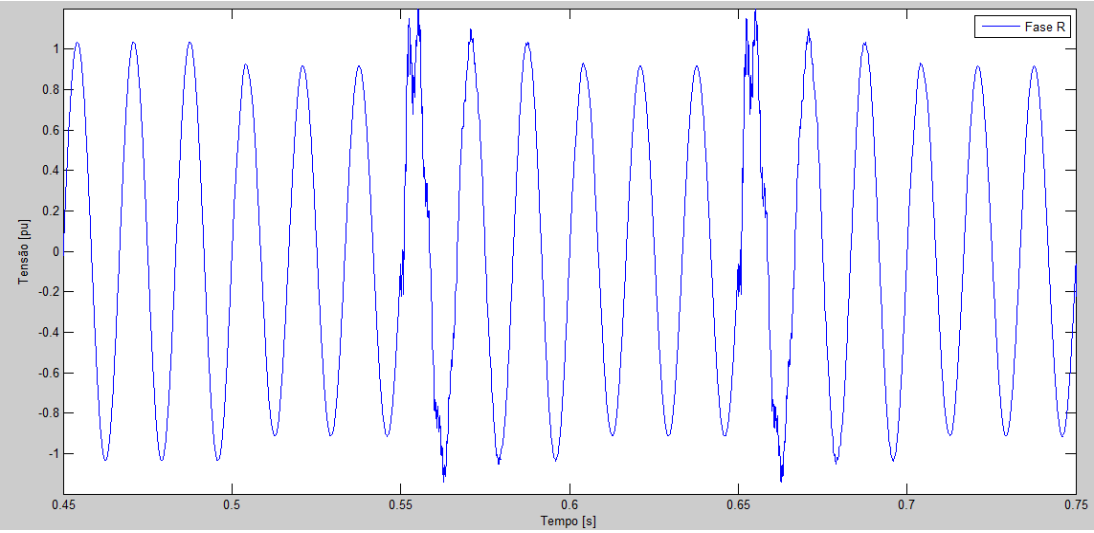
Fonte: Próprio autor.

Como vimos no presente capítulo, o forno a arco direto alimenta eletrodos que são alocados juntos com a sucata e por repetidas vezes ocorrem curtos-circuitos bifásicos ou trifásicos em seus terminais fazendo aparecer o efeito de flutuação de

tensão no barramento. No momento do curto circuito os eletrodos são retirados do forno para a extinção do arco elétrico e em seguida os mesmos são novamente mergulhados no forno retornando ao processo. O processo da existência de curto circuito, retirada dos eletrodos e novamente inseri-los leva vários segundos, porém para efeito de simulação foi diminuído este tempo e considerado somente o curto-circuito trifásico entre os eletrodos para melhor visualização do efeito.

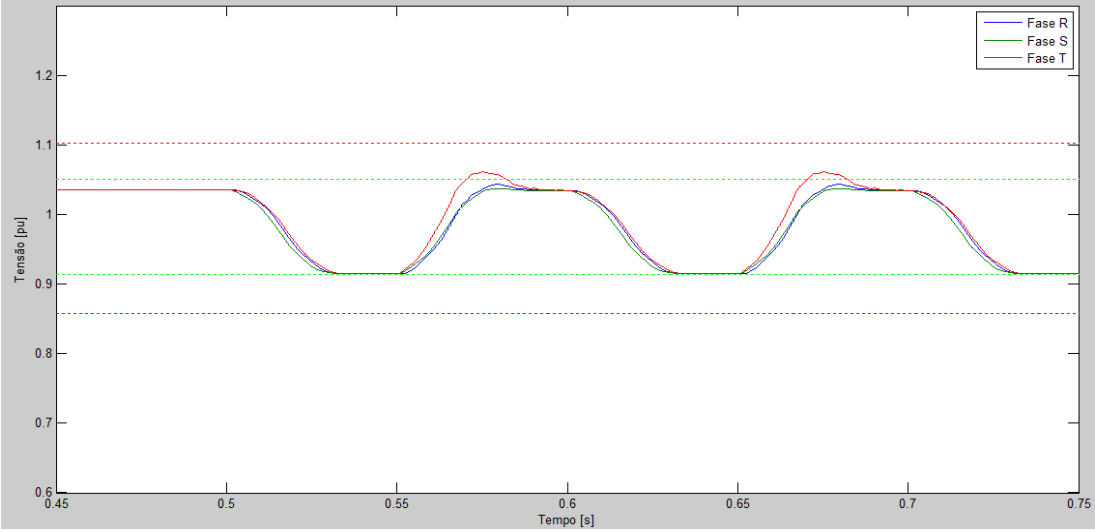
A figura 26 mostra a forma de onda da tensão da fase R e a figura 27 mostra o valor rms das três fases no barramento de entrada da fábrica. Para melhor visualização da forma de onda senoidal, foi reduzida a escala de tempo da figura 26 e a tensão expressa em pu. As tensões de base nas figuras são de 127 V_{rms} (fase-neutro) e as linhas vermelhas e verdes tracejadas representam os limites de tensão adequada e precária respectivamente.

Figura 26: Flutuação da Tensão no Barramento de Entrada da Fábrica



Fonte: Próprio autor.

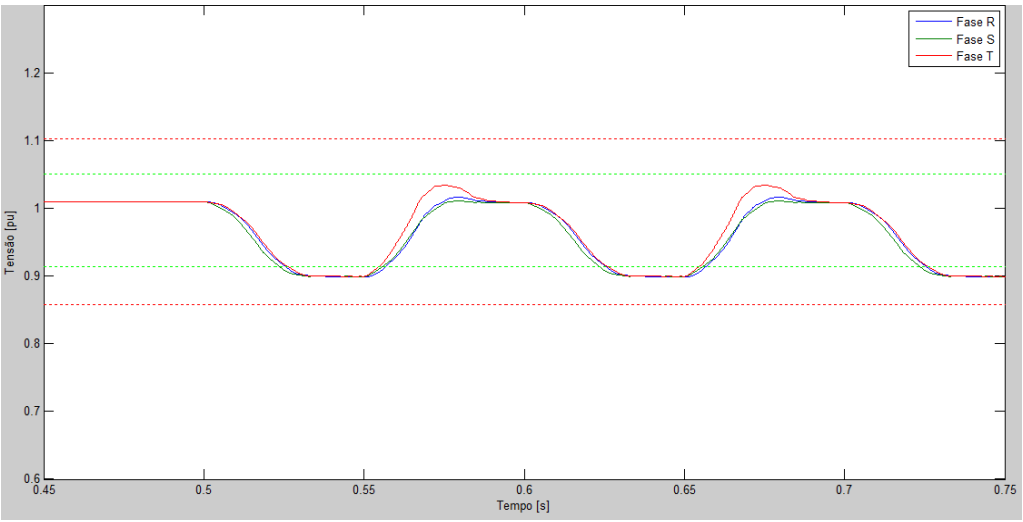
Figura 27: Flutuação da Tensão eficaz no Barramento de Entrada da Fábrica.



Fonte: Próprio autor.

O efeito em outra parte do sistema pode ser visto na figura 28, onde mostra a tensão rms no barramento de entrada da residência 2, estando a 120 metros de distância da fábrica.

Figura 28: Flutuação da Tensão eficaz no Barramento da Residência 2



Fonte: Próprio autor.

Percebe-se claramente a flutuação de tensão na residência 2, onde a tensão varia de aproximadamente 1 pu (faixa adequada de tensão) para 0,9 pu (faixa precária de tensão) durante o funcionamento do forno elétrico. A tabela 16 mostra o nível de tensão da fase R no barramento de entrada das residências 1, 3 e 4 na tensão de base de 127 V_{rms} (fase-neutro). As tensões da fase S e T foram ocultadas devido a similaridade com a fase R conforme constatado na figura 28.

Tabela 16: Tensões em pu dos barramentos

	Residência 1	Residência 3	Residência 4
Tempo [s]	Tensão R [pu]	Tensão R [pu]	Tensão R [pu]
0,5	1,015	1,015	1,009
0,55	0,904	0,905	0,899
0,6	1,015	1,014	1,009
0,65	0,904	0,905	0,899
0,7	1,015	1,014	1,009

Fonte: Próprio autor.

Como se pode observar nas figuras 27, 28 e tabela 16, a flutuação de tensão é nítida, onde por diversos períodos as tensões ficaram na região precária estipulada pelo PRODIST. Neste período, o efeito flicker poderia ser notado, causando incômodo visual na iluminação das residências próximas a fábrica e podendo causar o desligamentos de equipamentos.

4.5 Conclusões Específicas

No capítulo presente foram apresentados os principais indicadores de flutuação de tensão na rede elétrica, as normatizações brasileiras de flutuação de tensão na qual foram utilizadas para estudos. Foram expostas as características e principais fontes geradoras de flutuação de tensão, contando com uma ênfase para fornos a arco. A fim de normatização, foram destacadas as referências da norma IEEE e do módulo 8 do PRODIST principal fonte bibliográfica do projeto.

Por fim, foi mostrado o simulador de flutuação de tensão para melhor visualização do contexto, onde são destacadas as tensões rms e em regime senoidais nos principais barramentos de energia elétrica do simulador mostrando a flutuação do sistema elétrico devido ao funcionamento de um forno a arco direto.

Na simulação, fica evidente a flutuação de tensão, pois por diversas vezes a tensão rms varia entre o nível adequado e o nível precário de tensão. Porém o efeito de flicker não está relacionado somente com a variação dos níveis de tensão, mas está principalmente relacionado com a frequência equivalente gerada pela carga no sistema. Conforme visto no capítulo, o efeito flicker causa mais incômodo quando a frequência equivalente no sistema seja de 10 Hz, logo mesmo cargas que não

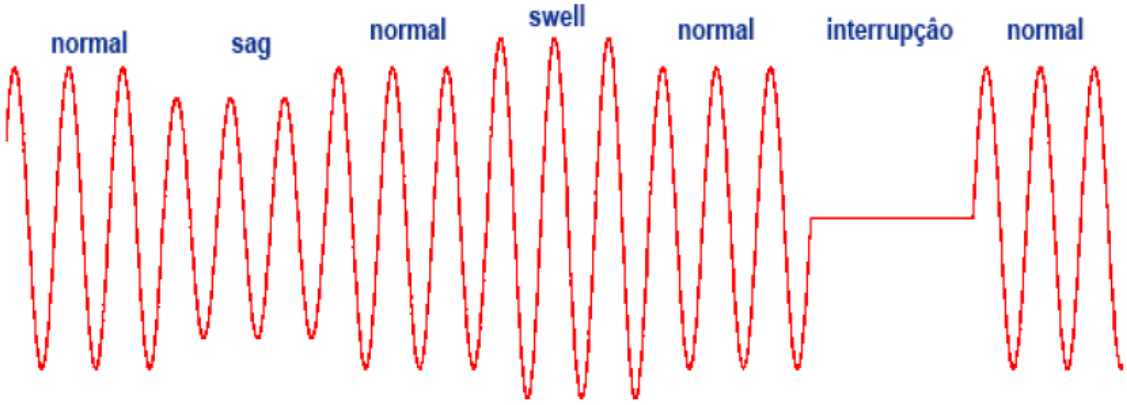
causam grandes variações de amplitude de tensão, mas devido a seus ciclos de funcionamento geram frequências equivalentes na rede elétrica de 1 Hz a 30 Hz, causarão grandes incômodos para os usuários da rede elétrica, sendo um problema de QEE.

5 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

O termo variação de tensão de curta duração (VTCD) é caracterizado pelos desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo (3).

A variação de tensão é definida pela maior variação da tensão eficaz em relação à tensão nominal do ponto considerado e pela duração do intervalo de tempo decorrido que a tensão tenha ultrapassado os limites (19). A ANEEL classifica variação de tensão de curta duração em 6 classes, conforme mostrados na tabela 17. A figura 29 mostra o comportamento da onda senoidal devido aos efeitos da variação de tensão.

Figura 29: Variações de Tensão de Curta Duração



Fonte: FRIZERA, (2013).

Onde:

Sag – Afundamento de tensão;

Swell – Elevação de tensão.

Tabela 17: Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

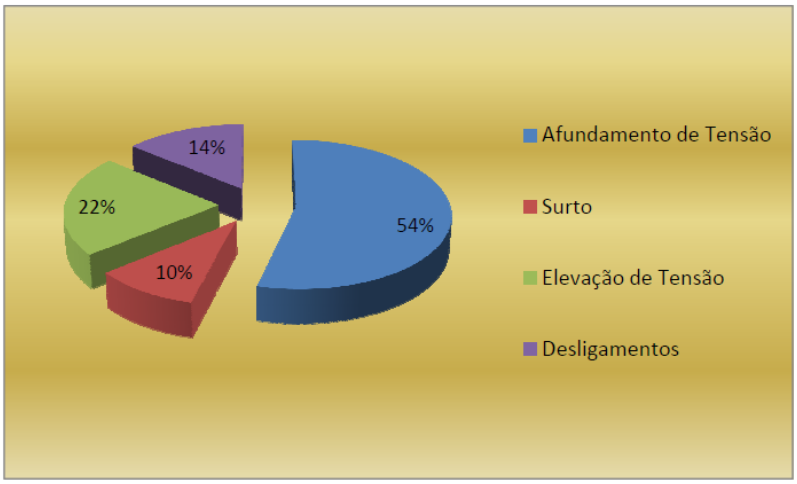
Classificação	Denominação	Sigla	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	IMT	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	AMT	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	EMT	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	ITT	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	ATT	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	ETT	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 pu

Fonte: ANEEL, (2012).

As variações de tensão geram enormes prejuízos para os usuários da rede elétrica, principalmente para as indústrias que possuem equipamentos sensíveis a estes fenômenos. Um equipamento é produzido para trabalhar em uma faixa de tensão específica, assim desvios fora desta faixa podem causar a operação inadequada, falha ou até a danificação do mesmo. Estudos mostram exemplos de prejuízos nas empresas devido a problemas de variação de tensão de curta duração e a figura 30 mostra a relação entre as perdas econômicas com o tipo de variação. (19)

- EUA – US$ 50 bilhões por ano foram gastos como resultado de interrupções de tensão;
- Indústrias de alimentos e bebidas: o custo típico devido afundamento de tensão é de US$ 87.000/ano
- Empresa Dupont economizou US$ 75 milhões/ano implantando soluções em qualidade de energia.

Figura 30: Composição do Prejuízo Industrial



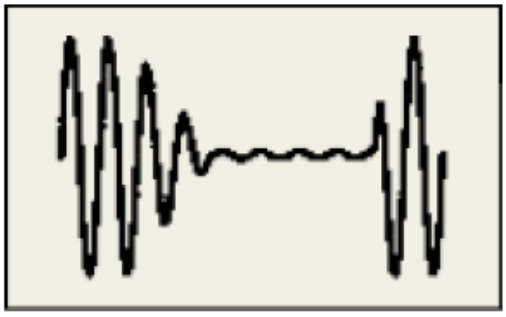
Fonte: MAIA, (2011).

A seguir serão apresentadas as principais características e causas dos afundamentos, interrupção e elevação de tensão.

5.1 Interrupção e Afundamento de Tensão

A Interrupção Momentânea de Tensão (IMT) é caracterizada no evento em que o valor eficaz da tensão é inferior a 0,1 pu em relação à tensão de referência durante um período inferior ou igual a 3 segundos. A Interrupção Temporária de Tensão (ITT) possui as mesmas características da IMT em relação à amplitude de tensão, se diferenciando apenas na duração do período, no qual se configura um período superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos. A figura 31 mostra a forma de onda típica de uma IMT.

Figura 31: Interrupção Momentânea de Tensão



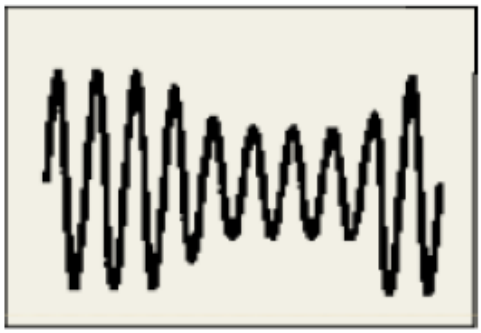
Fonte: MAIA, (2011).

As interrupções de tensão são provocadas por descargas atmosféricas, acionamentos de religadores, acionamentos de dispositivos de segurança, causas naturais (queda de galhos nos fios) e curtos circuitos temporários. Como

consequência, as interrupções geram desligamentos de equipamentos, reinicialização de máquinas eletrônicas, falha em fontes chaveadas, paradas de máquinas elétricas, etc. gerando grandes perdas econômicas para indústrias e residências.

O Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT) é caracterizado no evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu em relação à tensão de referência durante um período superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos. O Afundamento Temporário de Tensão (ATT) possui as mesmas características do AMT em relação à amplitude de tensão, se diferenciando apenas na duração do período, no qual se configura um período superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos. A figura 32 mostra a forma de onda de AMT.

Figura 32: Afundamento Momentâneo de Tensão



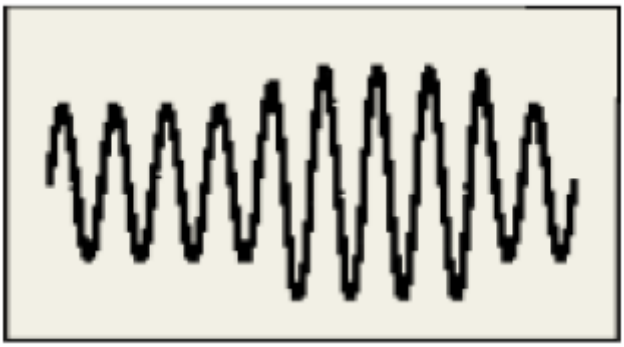
Fonte: MAIA, (2011).

As principais causas de afundamentos de tensão são as energizações de cargas de altas potências, condutores danificados, partidas de motores, acionamentos de bancos de capacitores, geração instável de energia (gerador, UPS, etc) e curtos circuitos em qualquer ponto de fornecimento de energia. O curto circuito provoca uma grande elevação da corrente, ocasionando grandes quedas de tensão nas impedâncias do sistema. Os afundamentos de tensão provocam falhas nos equipamentos, reinicialização de equipamentos eletrônicos, acionamentos de relés de falta de subtensão, causando grandes impactos para os consumidores de eneriga elétrica.

5.2 Elevação de Tensão

A Elevação Momentânea de Tensão (EMT) ou “swell” é caracterizada no evento em que o valor eficaz da tensão é superior a 1,1 pu em relação à tensão de referência durante um período superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos. A Elevação Temporária de Tensão (ETT) possui as mesmas características da EMT em relação à amplitude de tensão, se diferenciando apenas na duração do período, no qual se configura um período superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos. A figura 33 mostra a forma de onda de EMT.

Figura 33: Elevação Momentânea de Tensão



Fonte: MAIA, (2011).

As elevações de tensão são provocadas principalmente pelas desnergizações de cargas de potências elevadas, manobras de bancos de capacitores e atuação de reguladores de tensão, descargas atmosféricas. A sobretensão nos equipamentos podem causar danos como queima de equipamentos eletrônicos, acionamentos de dispositivos de proteção (disjuntores, fusíveis, relés de proteção), explosão de bancos de capacitores, etc. provocando grandes impactos nas indústrias pela paralização da produção ou nas residências pela queima de equipamentos. (19)

5.3 Normatização

No Brasil, os eventos de afundamento de tensão de curta duração são classificados pela ANEEL de acordo com a tabela 17. Além dos parâmetros de amplitude e duração definidos na tabela, a severidade da VTCD é caracterizada também pela frequência de ocorrência do evento em um determinado período no qual o barramento foi monitorado. (3)

As variações de tensão não são utilizadas como critérios de compensação ao consumidor conforme visto no capítulo 2. As informações servem apenas como referências de desempenho das barras de unidades consumidoras atendidas pelo Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT).

5.4 Simulação

Para visualização dos efeitos de variação de tensão de curta duração em um sistema elétrico, esta etapa do projeto demonstrará os efeitos de curtos circuitos, partida de motor e a perda de um ramal de alta potência em um sistema elétrico. As três situações descritas acima foram separadas em três subseções do presente capítulo.

5.4.1 Curto Circuito

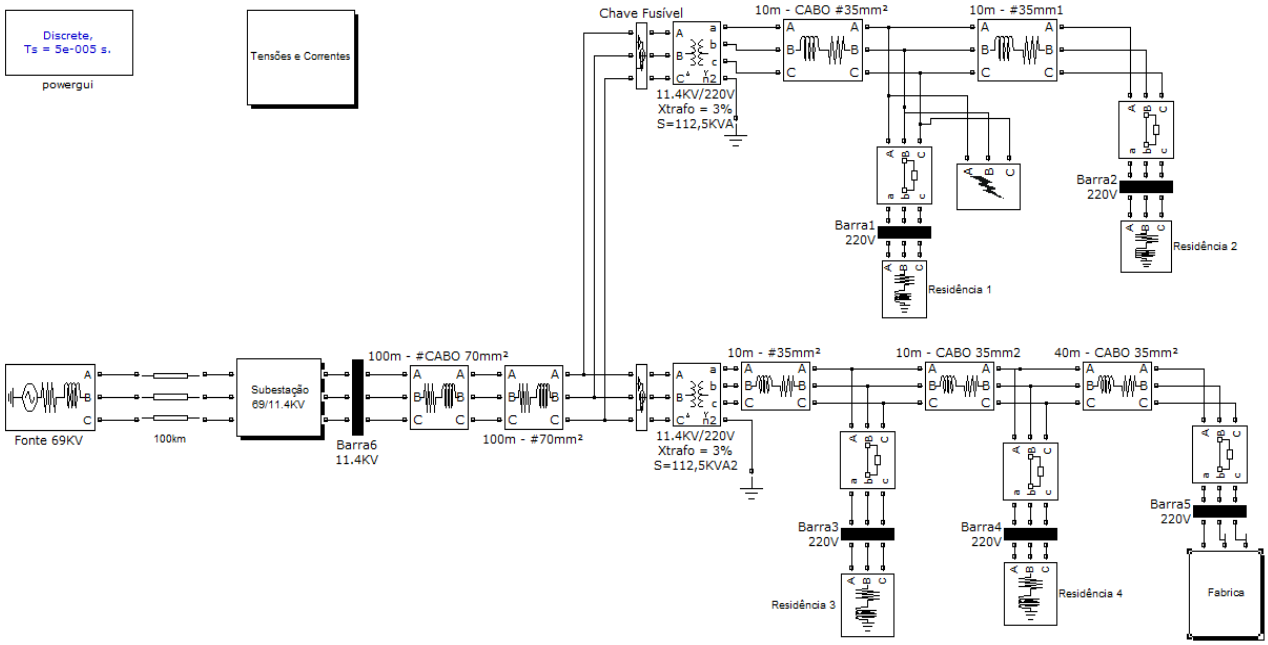
Conforme descrito anteriormente, os curtos circuitos são os principais responsáveis pelas interrupções ou afundamentos de tensão em uma rede elétrica. Tal fato será demonstrado simulando um curto circuito em um ramal alimentador do sistema elétrico conforme apresentado na figura 34. Note que o curto circuito ocorre no segundo ramal de distribuição próximo à primeira residência do sistema elétrico. Os dados elétricos do sistema estão descritos na tabela 18.

Tabela 18: Parâmetros do Simulador para Estudo de Curto-Circuito

	Bloco	Parâmetros
TRANSMISSÃO	Fonte 69 kV	Vrms=69 kV; X/R = 1,84026
	LT 100 km	Distância=100Km; R1=0,01273 Ω/Km; R0=0,3864Ω/Km; L1=0,9337mH/Km; L2=4.1264mH/Km; C1=12.74nF/Km; C2=7,751nF/Km
	Subestação	Transformador 1MVA; Zt=9,31%; 69kV:11,4kV
DISTRIBUIÇÃO	Cabo 35mm²	R=0,87211 Ω/Km; L=0,34140 Ω/Km
	Cabo 70mm²	R=0,5694 Ω/Km; L=0,0727 Ω/Km
	Residências	Carga: 220Vrms; P=15kW; Q=4.93kVAr
	Fábrica Baixa Tensão	Carga: 220Vrms; P=15kW; Q=4.93kVAr

Fonte: Próprio autor.

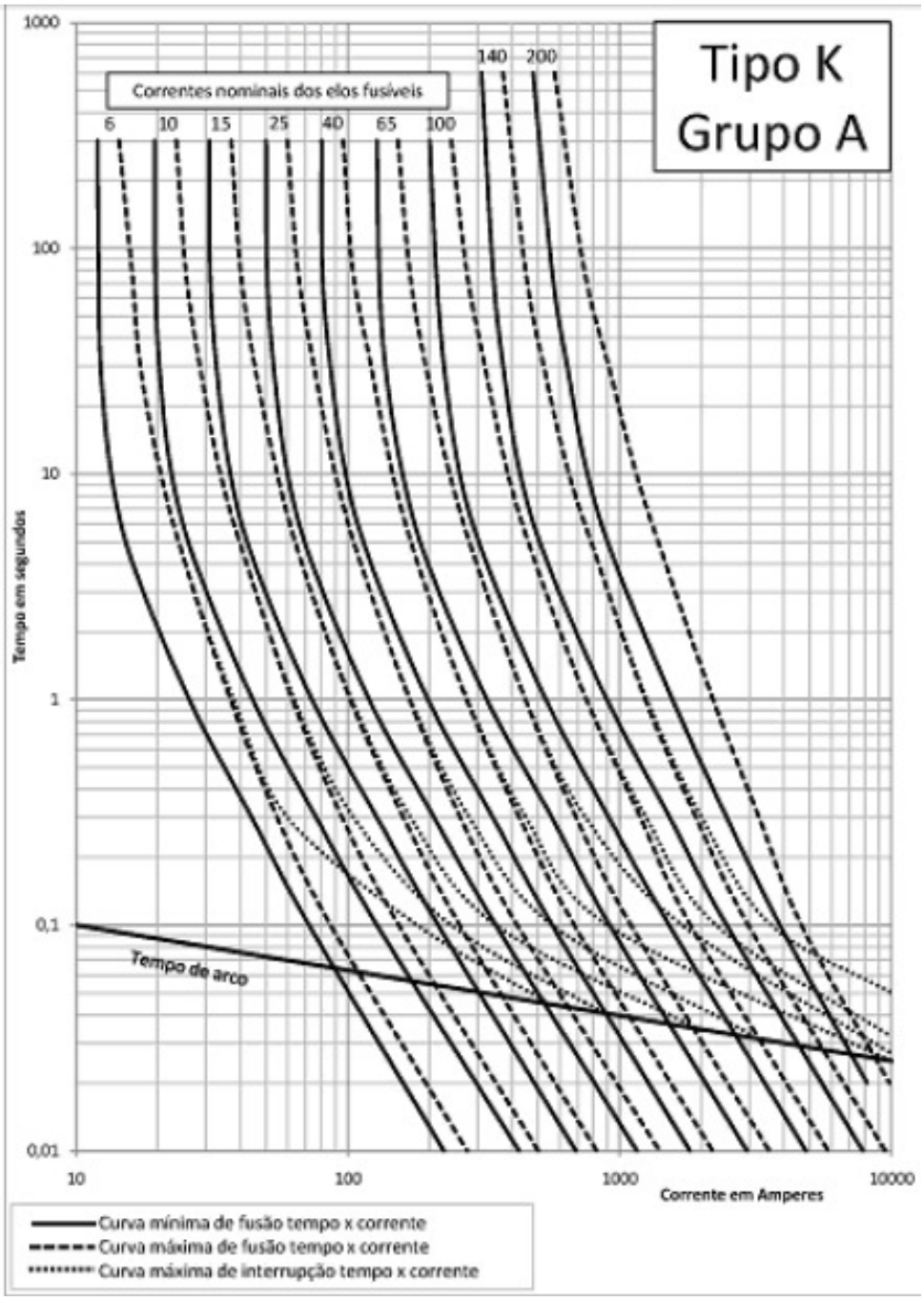
Figura 34: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Curto - Circuito



Fonte: Próprio autor.

A duração do curto circuito, como em muitos casos da rede elétrica, será determinada pelo tempo de atuação da chave fusível situada a montante do transformador alimentador do ramal de distribuição. O tempo de rompimento do elo fusível é determinado pela curva IxT conforme apresentado na figura 35. O elo fusível foi dimensionado para corrente nominal de 6 A do tipo K na tensão de 11,4 kV_{rms}.

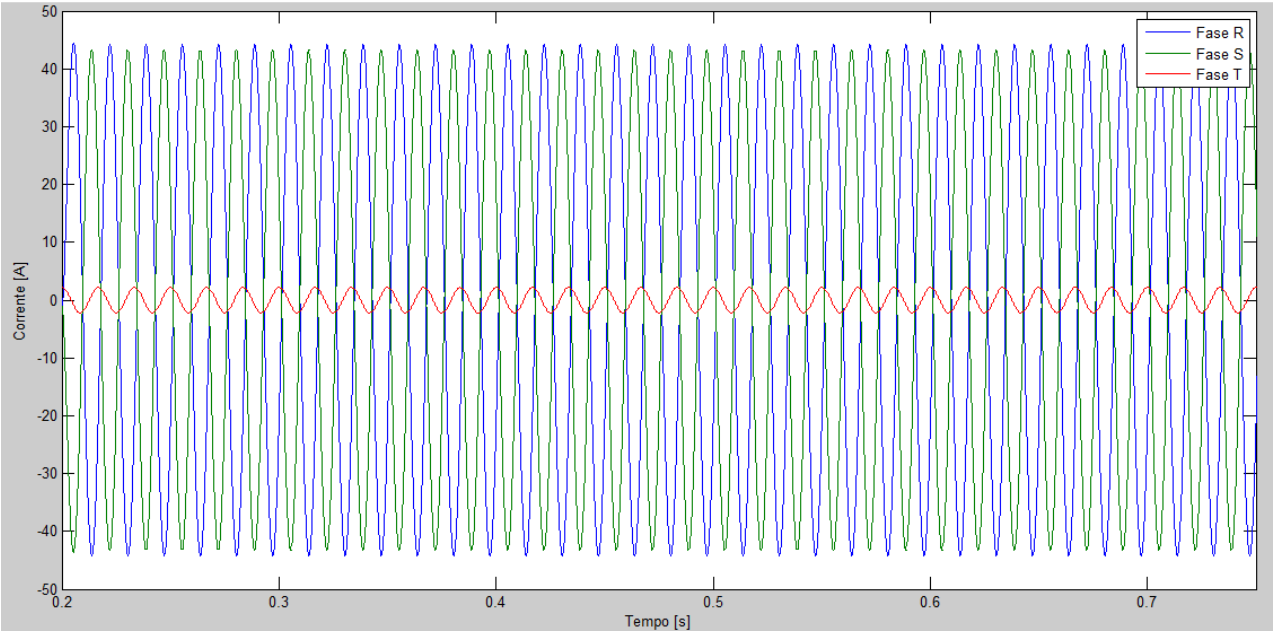
Figura 35: Curva de Corrente x Tempo dos fusíveis tipo H



Fonte: CELG, (2011).

Para um curto circuito monofásico no secundário do transformador (no nível de tensão 220 V_{rms}), a corrente de curto chega a uma amplitude aproximada de 44 A no nível de tensão de 11,4 kV_{rms} conforme mostrado na figura 36. De acordo com a figura 35, o tempo de rompimento do elo fusível será de aproximadamente 0,5 segundos.

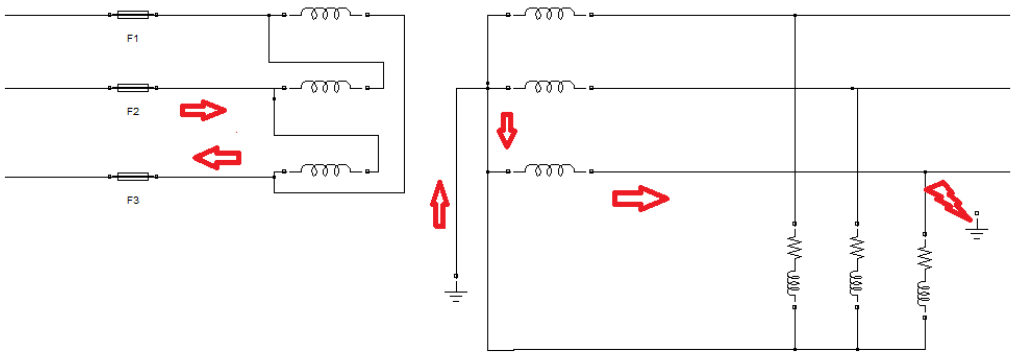
Figura 36: Corrente de curto circuito fase terra no nível de tensão 11,4 kV



Fonte: Próprio autor.

Devido à configuração dos transformadores de distribuição (delta-estrela), a falta monofásica no secundário do transformador induzirá dois fusíveis a montante do transformador distribuidor a atuarem, rompendo o elo fusível. A explicação pode ser visualizada na figura 37, onde perceber-se a circulação de uma corrente de curto circuito em duas fases do primário do transformador, assim a corrente provocará a atuação das duas chaves fusíveis, fazendo que não tenha circulação de corrente no segundo ramal de distribuição.

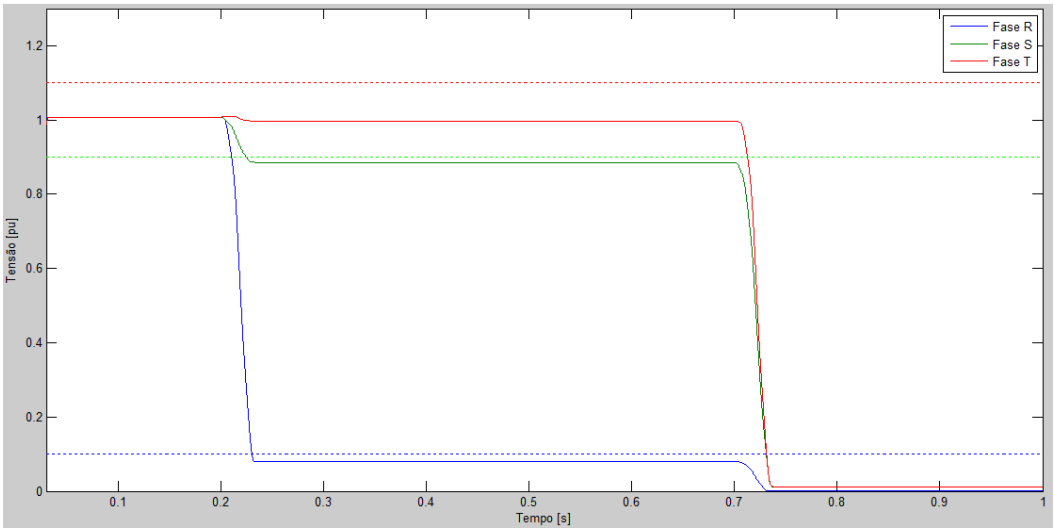
Figura 37: Caminho da corrente em um curto circuito fase-terra



Fonte: Próprio autor.

Conforme detalhado anteriormente, o curto-circuito monofásico iniciará no tempo de 0,2 segundos próximo a residência 1 do sistema elétrico e permanecerá por 0,5 segundos devido o tempo de atuação da chave fusível a montante do transformador de distribuição. No tempo de 0,2 segundos a 0,7 segundos veremos uma interrupção momentânea da fase R (fase em curto) e um afundamento momentâneo da fase S devido o curto. Quando a proteção eliminar a falta, não haverá circulação de corrente no segundo ramal de distribuição devido à configuração do transformador, conforme explicado anteriormente, logo teremos uma interrupção permanente das três fases neste ramal após o tempo de 0,7 segundos conforme visto na figura 38. A tensão de base do sistema é 127 V_{rms} (fase-neutro) e as linhas azul, verde e vermelha tracejadas representam os limites descritos no PRODIST de interrupção, afundamento e elevação de tensão, respectivamente.

Figura 38: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 1



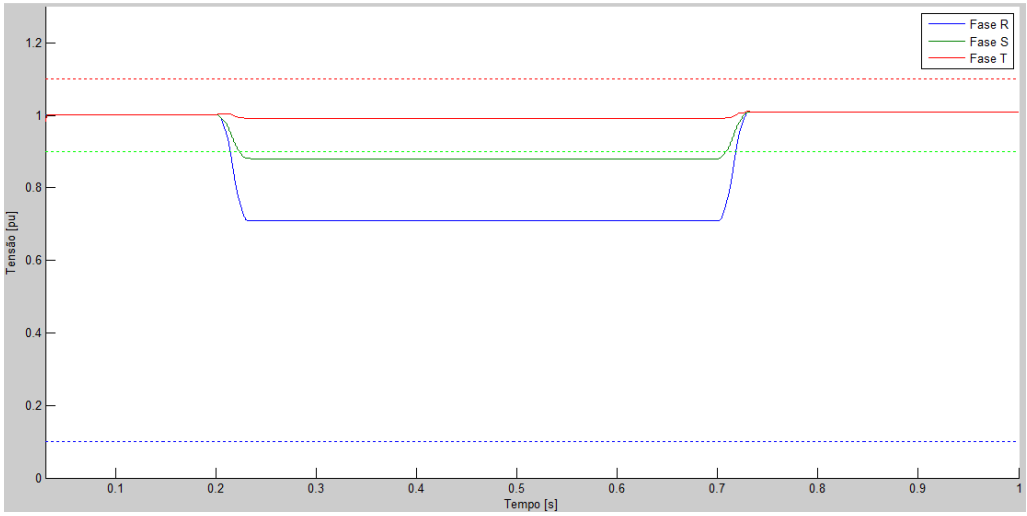
Fonte: Próprio autor.

Conforme visto acima, tanto a residência 1, quanto a residência 2, terão interrupção permanente das três fases devido ao acionamento da chave fusível para extinção do curto-circuito. Se no lugar da chave fusível, tivéssemos um religador automático, ao invés de uma interrupção permanente das três fases, veríamos um afundamento momentâneo de tensão da fase S e uma interrupção momentânea de tensão da fase R.

No primeiro ramal, no momento do curto-circuito visualizamos um afundamento momentâneo de tensão das fases R e S, sendo restauradas quando os fusíveis do segundo ramal atuam e extinguem a falta. A visualização do efeito pode ser visto na

figura 39, onde mostra a tensão no barramento de entrada da terceira residência. Na figura a tensão de base do sistema é 127 V_{rms} (fase-neutro) e as linhas azul, verde e vermelha tracejadas representam os limites descritos no PRODIST de interrupção, afundamento e elevação de tensão, respectivamente.

Figura 39: Tensão no Barramento de Entrada da Residência 3



Fonte: Próprio autor.

Pode-se perceber pela figura, a influência do curto circuito no segundo ramal sobre o primeiro ramal, provocando um afundamento momentâneo de tensão em duas fases. Nesta residência, durante tal evento provavelmente seria observado quedas de tensão, resultando no desligamento de equipamentos eletrônicos e outros equipamentos sensíveis a falta de energia elétrica.

Curtos circuitos bifásicos, trifásicos, trifásico e terra, provocariam efeitos similares no sistema elétrico no quesito de afundamento e interrupção de tensão, porém com mais severidade para o sistema.

5.4.2 Partida de Motores

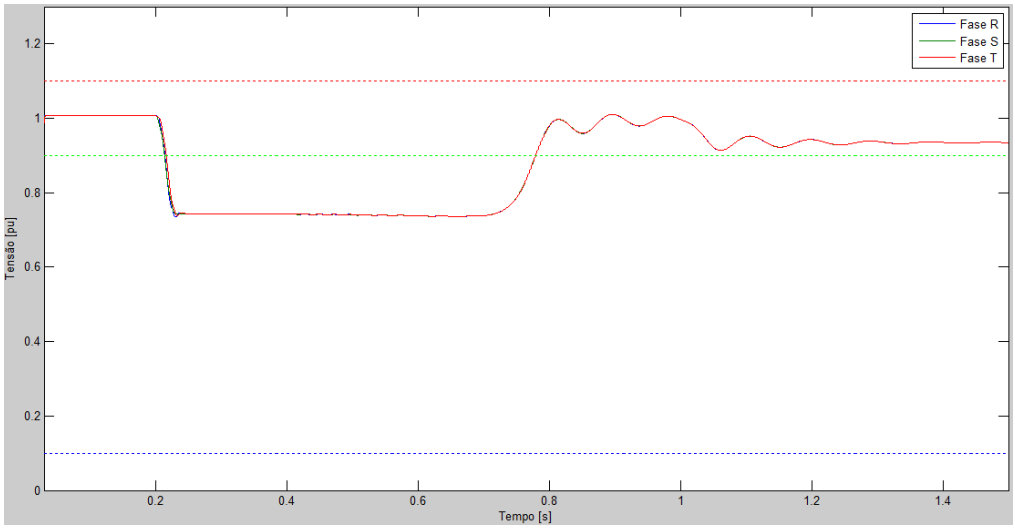
Como vimos, curtos-circuitos geram afundamentos e interrupções de tensão indesejáveis no sistema elétrico. Outro responsável pelos afundamentos de tensão são as partidas de grandes motores no sistema elétrico. Devido aos afundamentos durante a partida, algumas distribuidoras de energia elétrica exigem em locais supridos por tensões secundárias de energia elétrica, que motores elétricos com potência acima de 5 CV utilizem dispositivos que limitem a corrente durante a

partida, por exemplo, soft start, inversores de frequência, chaves compensadoras, partidas estrela-triângulo, etc. (20)

Mesmo com a normatização imposta por algumas distribuidoras, para visualização do afundamento de tensão provocado na rede elétrica durante a partida de motores, será demonstrada a situação de uma partida direta de um motor de 50 CV. O sistema elétrico utilizado na simulação foi o mesmo da figura 34, porém sem o curto circuito descrito na respectiva seção e com o sistema de partida do motor dentro da fábrica no primeiro ramal. Os parâmetros do sistema elétrico estão descritos na tabela 18, porém a fábrica possui um motor de indução trifásico de 50 CV com partida direta da rede elétrica.

A partida do motor inicia no tempo de 0,2 segundos e se estende até 1,4 segundos. Neste período percebe-se o afundamento momentâneo de tensão no sistema elétrico. A figura 40 mostra as tensões rms no barramento de entrada da fábrica durante a partida do motor. A tensão de base do sistema é 127 V_{rms} (fase-neutro) e as linhas azul, verde e vermelha tracejadas representam os limites descritos no PRODIST de interrupção, afundamento e elevação de tensão, respectivamente.

Figura 40: Tensão Eficaz no Barramento de Entrada da Fábrica

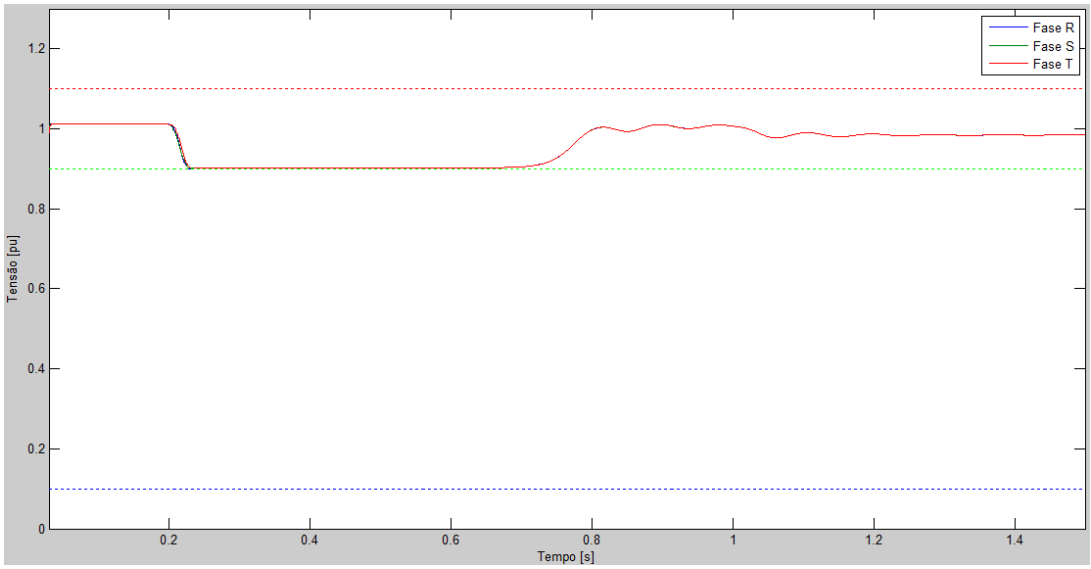


Fonte: Próprio autor.

Observando a figura acima, vê-se um afundamento momentâneo de tensão nas três fases do barramento de entrada da fábrica, situada no primeiro ramal de

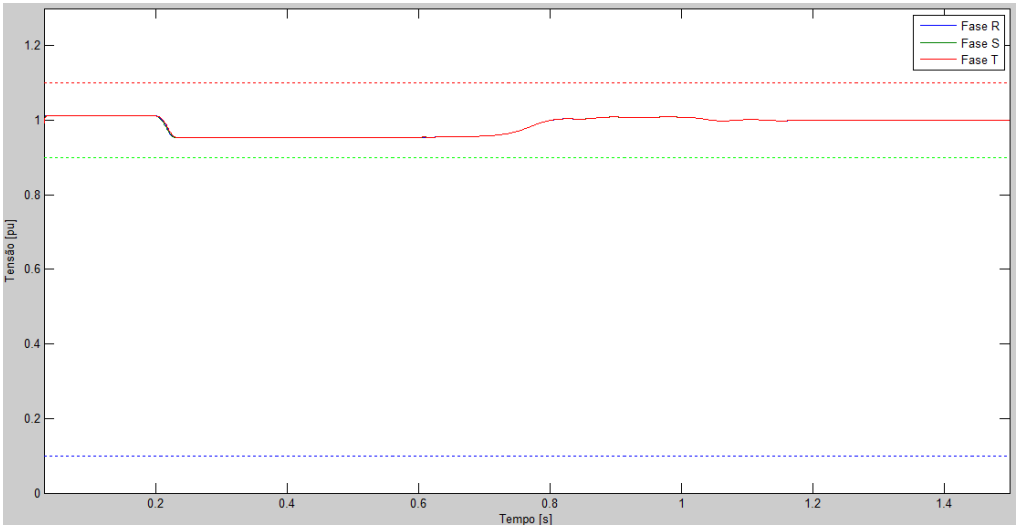
alimentação. Este afundamento de tensão provavelmente não acontecerá somente no barramento da fábrica já que as residências próximas à fábrica sofrerão consequência devido à partida de uma grande carga no sistema elétrico. As figuras 41 e 42 mostram os barramentos de entrada das residências 1 e 3, estando a 70 metros e 50 metros de distância da fábrica, respectivamente.

Figura 41: Tensão Eficaz no Barramento de Entrada da Residência 3



Fonte: Próprio autor.

Figura 42: Tensão Eficaz no Barramento de Entrada da Residência 1



Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que na residência 3 temos afundamento momentâneo de tensão das três fases durante a partida do motor. Na residência 1 mesmo tendo uma

diminuição de amplitude da forma de onda da tensão, o evento não se caracteriza um afundamento momentâneo de tensão, pois a tensão mínima do sistema é maior do que o limite de 0,9 pu em relação à tensão de referência. Mesmo assim, percebe-se a influência de grandes cargas no sistema elétrico provocando grandes afundamentos e consequências drásticas para consumidores ligados à rede elétrica.

5.4.3 Elevação de Tensão

Como dito, as elevações de tensão no sistema elétrico são provocadas principalmente pelas desnergizações de grandes cargas, manobras de bancos capacitivos, atuação de reguladores de tensão e descargas atmosféricas. Nesta etapa, será demonstrada a atuação de reguladores de tensão, um típico equipamento da rede elétrica.

Os reguladores de tensão estão localizados por toda a rede elétrica e tem o objetivo de manter a tensão a jusante do equipamento no nível adequado regularizado pela ANEEL e descrito no capítulo 2.

Para regular a tensão, o regulador necessita de um tempo, mesmo que pequeno para verificar o nível de tensão e potência a jusante do equipamento e realizar a regulação para os valores ajustados. Assim, variações de cargas de altas potências (entrada ou saídas de ramais) no sistema provocam elevações ou afundamentos de tensão durante o período de ajuste dos reguladores.

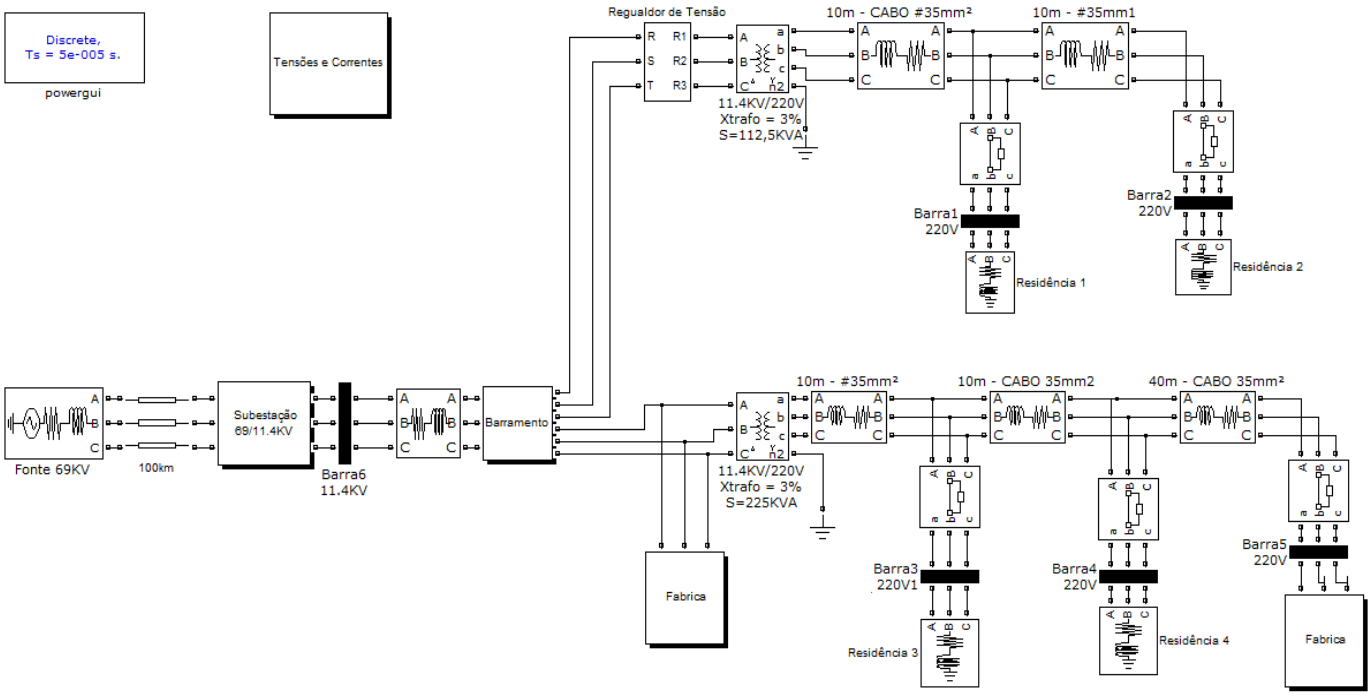
A figura 43 mostra o sistema elétrico utilizado para demonstração de elevação de tensão. Note-se que, após a subestação, encontra-se um barramento com dois ramais de saída. O primeiro ramal contém uma grande concentração de carga, sendo composta por fábricas alimentadas em média tensão e um sistema de distribuição de baixa tensão. O segundo ramal de saída do barramento é composto por um sistema de distribuição em baixa tensão contando apenas com cargas de baixa potência (residências). O segundo ramal possui um regulador de tensão, com o propósito de deixar a tensão no nível adequado de tensão exigido pela ANEEL, descrito no capítulo 2. Os dados elétricos do sistema estão descritos na tabela 19.

Tabela 19: Parâmetros do Simulador para Estudo de Elevação de Tensão

	Bloco	Parâmetros
TRANSMISSÃO	Fonte 69 kV	Vrms=69 kV; X/R = 1,84026
	LT 100 km	Distância=100Km; R1=0,01273 Ω/Km; R0=0,3864Ω/Km; L1=0,9337mH/Km; L2=4.1264mH/Km; C1=12.74nF/Km; C2=7,751nF/Km
	Subestação	Transformador 1MVA; Zt=9,31%; 69kV:11,4kV
DISTRIBUIÇÃO	Cabo 35mm²	R=0,87211 Ω/Km; L=0,34140 Ω/Km
	Cabo 70mm²	R=0,5694 Ω/Km; L=0,0727 Ω/Km
	Residência 1 e 2	Carga: 220Vrms; P=29,4kW; Q=5,9699kVAr
	Residência 3 e 4	Carga: 220Vrms; P=60kW; Q=14,79kVAr
	Fábrica Média Tensão	Transformador 500kVA; Zt=3%; 11,4kV:220V Carga: 220Vrms; P=368kW; Q=156,77kVAr
	Fábrica Baixa Tensão	Carga: 220Vrms; P=75kW; Q=14,79kVAr

Fonte: Próprio autor.

Figura 43: Sistema Elétrico do Simulador Utilizado para Estudo de Elevação de Tensão

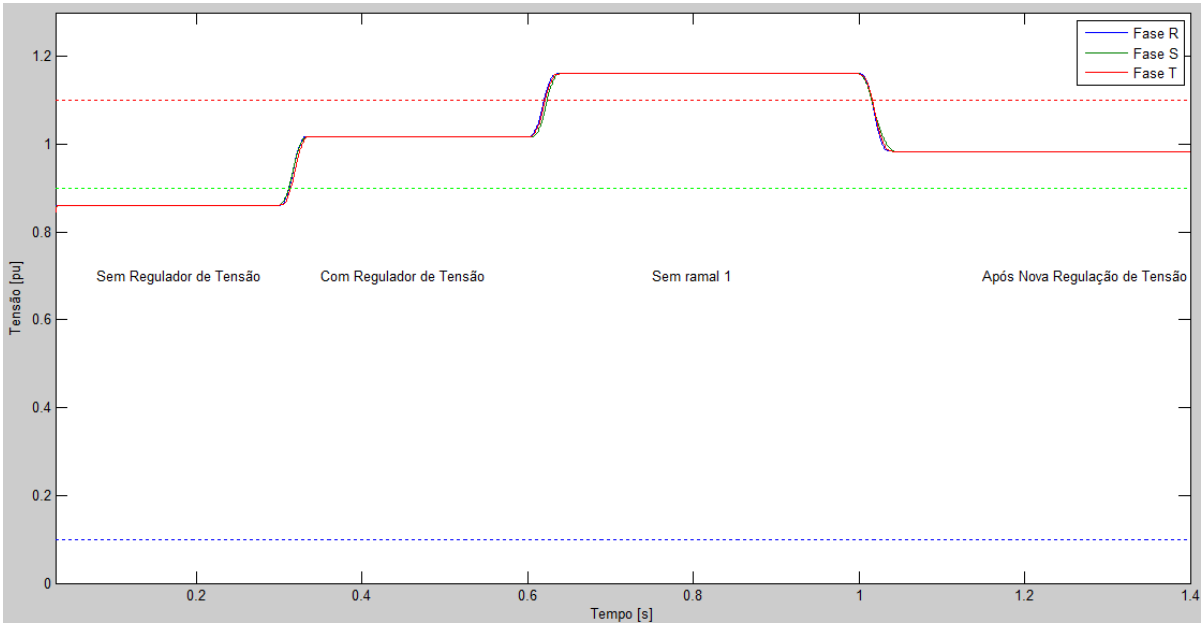


Fonte: Próprio autor.

Com o sistema com carga pesada, é necessário que haja regulação de tensão no segundo ramal. Porém caso aconteça alguma falha e ocorra a perda de potência do primeiro ramal, observaremos uma elevação de tensão no segundo ramal devido à regulação de tensão. Após o período de ajuste do regulador de tensão, os níveis de

tensão voltarão aos valores ajustados. A figura 44 mostra os níveis de tensão rms no barramento da residência 1 para os seguintes casos: sem regulador de tensão, com o regulador de tensão, com o primeiro ramal sob falha e após a nova regularização de tensão. Na figura a tensão de base do sistema é 127 V_{rms} (fase-neutro) e as linhas azul, verde e vermelha tracejadas representam os limites descritos no PRODIST de interrupção, afundamento e elevação de tensão, respectivamente.

Figura 44: Barramento de Entrada da Residência 1



Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que no momento de falha no primeiro ramal do barramento distribuidor, as tensões das três fases no segundo ramal sofrem elevações, caracterizando uma elevação momentânea de tensão de cada fase, já que a elevação de tensão de cada fase permaneceu superior a 1,1 pu em relação à tensão de referência durante um período maior que 1 ciclo. Após o ajuste do regulador, as tensões das três fases voltam ao nível adequado de tensão. Devido à simetria do sistema, os outros barramentos do primeiro ramal sofrerão com consequências parecidas, porém quanto mais longe do regulador de tensão, menor será o efeito de elevação de tensão.

5.5 Conclusões Específicas

No capítulo presente, foram apresentadas as principais características de variações de tensão de curta duração, as principais normatizações no sistema elétrico

brasileiro, os quais foram utilizados para estudos. Foram também expostas as principais fontes geradoras de variações e as consequências nos equipamentos e sistema elétrico conforme visto nas etapas de simulação.

Infelizmente, apesar das gravidades produzidas por variações de tensões no sistema elétrico aos consumidores, as normatizações não punem as concessionárias ou clientes que geram tais efeitos. Assim cabe aos consumidores de energia elétrica investir em soluções para evitarem transtornos e prejuízos.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho apresentou vários aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica no Brasil. Além desta síntese também foi implementada a modelagem computacional de um sistema de distribuição de energia elétrica no software Matlab com o propósito da criação de um simulador que permitisse ilustrar os principais distúrbios no sistema elétrico que afetam a qualidade de energia.

A avaliação da qualidade de energia comercializada no país teve como principal foco os eventos especificados no PRODIST, pela Agência Nacional de Energia Elétrica, como por exemplo, regime permanente, harmônicas na rede elétrica, flutuações de tensão e variações de tensão de curta duração.

Foram apresentados os indicadores responsáveis pela análise das distorções harmônicas, normatizações, efeitos de cargas não lineares e a simulação dos eventuais problemas que um motor de corrente contínua pode trazer para o sistema elétrico.

De maneira análoga as harmônicas, foram expostos os indicadores responsáveis pela análise de flutuação de tensão, variação de tensão de curta duração, normatizações do PRODIST, exemplos de cargas que fazem as tensões do sistema oscilarem, além da simulação da operação de forno a arco direto, curtos circuitos, partidas de motores no sistema elétrico.

Conforme visto, apesar destas eventuais situações serem normatizadas no país, os consumidores prejudicados ainda não são amparados em alguns casos. Alguns valores normativos servem apenas como parâmetros de referência mostrando que a legislação brasileira ainda tem que evoluir no quesito de qualidade de energia elétrica.

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, pode ser sugerido como trabalho futuros a continuação do projeto para outros efeitos normatizados pela ANEEL no PRODIST não desenvolvidos neste projeto, por exemplo, fator de desequilíbrio e

variação de frequência além da criação de uma interface para o simulador e melhorias no mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) COLNADO, GUILHERME P. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento em tempo real da tensão da rede com acesso remoto.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

(2) MEHL, EVALDO L. M. **Qualidade de Energia Elétrica**. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná. Disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads.html> Acesso em: 2 de abril de 2014.

(3) AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (ANEEL), **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2012.

(4) UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Programa Educar.** Disponível em <educar.sc.usp.br/licenciatura/2001/energia/transmissaoedistribuicaodaenergiaeletrica.htm> Acesso em: 27 de abril de 2014.

(5) HANSELMAN, DUANE; LITTLEFIELD, BRUCE. **Matlab 6 - Curso Completo**. 1.ed. São Paulo: Pearson Education, 2003.

(6) FRIZERA, LUCAS E. **Notas de Aula - Qualidade de Energia Elétrica**. Colegiado de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo.

(7) DUGAN, ROGER C.; MCGRANAGHAN, MARK F.; SANTOSO SURYA; BEATY, WAYNE H. **Electrical Power Systems Quality**. 2.ed. United States of America: McGraw-Hill, 2003

(8) DA SILVA, A. R. **Comportamento da função de proteção de sobrecorrente instantânea frente a distorções harmônicas nos relés de proteção numéricos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

(9) LUCAN, JEAN M. V**. Análise das distorções harmônicas do prédio sede da Justiça Federal do Espírito Santo.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Colegiado de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

(10) INSTITUTE OF ELECTRIC AND ELECTRONIC ENGINEERS (IEEE) **IEEE Std 519-1992**: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. New York, 1993.

(11) DE MEDEIROS, R. Z. **Modelagem de cargas harmônicas de impedância constante por fontes de corrente.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espirito Santo, Vitória, 2013.

(12) TEIXEIRA, A. D. **Análise das distorções harmônicas:** estudo de um caso industrial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

(13) _____. **IEEE Std 1531-2003**: Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. New York. 2003.

(14) SILVA, SELÊNIO R. **Notas de Aula – Variações e Flutuações de Tensão**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

(15) CANDIDO, MARCOS R. **Aplicação da Transformada de Wavelet na Análise da Qualidade de Energia em Fornos Elétricos a Arco**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

(16) MAMEDE, JOÃO F. **Instalações Elétricas Industriais**. 8.ed. Rio de Janeiro, Brasil. LTC. 2010.

(17) PAULILLO, GILSON; TEIXEIRA, MATEUS. **Qualidade de Energia Elétrica – Cap VII – Flutuações de tensão**.

(18) MARDEGAN, CLÁUDIO S. **Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais**. 1.ed. São Paulo: Atitude Editorial. 2012.

(19) MAIA, REINALDO M. **Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

(20) ENERGIAS DE PORTUGAL (EDP). **Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária – Edificações Individuais**, 2014.

(21) CELG DISTRIBUIÇÃO. **Norma Técnica Celg D – Elos Fusíveis de Distribuição**, 2011.