

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA ÊNFASE ELETROTÉCNICA

BRUNO SABINO SCOLARI
FERNANDO BONANCIO CERQUEIRA
PETERSON LUIZ KRAVETZ

**CARACTERIZAÇÃO DOS PROBLEMAS RELATIVOS À QUALIDADE DE
ENERGIA ELÉTRICA CAUSADOS POR UM FORNO DE AQUECIMENTO A
INDUÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2013

BRUNO SABINO SCOLARI
FERNANDO BONANCIO CERQUEIRA
PETERSON LUIZ KRAVETZ

**CARACTERIZAÇÃO DOS PROBLEMAS RELATIVOS À QUALIDADE DE
ENERGIA ELÉTRICA CAUSADOS POR UM FORNO DE AQUECIMENTO A
INDUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2), do curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro.

Orientador: Prof. Joaquim Eloir Rocha, Dr. Eng.

CURITIBA
2013

BRUNO SABINO SCOLARI
FERNANDO BONANCIO CERQUEIRA
PETERSON LUIZ KRAVETZ

Caracterização dos Problemas Relativos à Qualidade de Energia Elétrica Causados Por um Forno de Aquecimento a Indução

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 19 de Julho de 2013.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Joaquim Eloir Rocha, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Joaquim Eloir Rocha
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Antonio Carlos Pinho
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jaime Favretto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

SCOLARI, Bruno S.. CERQUEIRA, Fernando B.. KRAVETZ, Peterson L.. Caracterização dos Problemas Relativos à Qualidade de Energia Elétrica Causados Por um Forno de Aquecimento a Indução. 2013. 115 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

O aquecimento indutivo vem se tornando uma solução cada vez mais viável na área siderúrgica, pois apresenta grande eficiência energética, alta taxa de aquecimento, reduzido nível de oxidação do material processado, baixa emissão de poeira, ruídos e gases, além de proporcionar melhor ambiente de trabalho e fácil controle do processo de produção. Os mesmos elementos da área de eletrônica de potência que tornaram viável a ampla utilização do aquecimento indutivo são também responsáveis por significativos problemas no âmbito da qualidade de energia elétrica, e é nesse campo em que o presente trabalho se foca. Este trabalho apresenta uma fundamentação teórica, inicialmente contextualizando e trazendo informações acerca dos fornos de aquecimento a indução e, em seguida, abordando aspectos sobre qualidade de energia. A fundamentação abordou, além disso, as normatizações técnicas a respeito dos índices de qualidade de energia elétrica. A etapa seguinte envolveu medições e verificações em um forno de aquecimento a indução para se identificar e quantificar os problemas de qualidade de energia presentes. A partir destas medições, os dados obtidos foram organizados na forma de gráficos e/ou tabelas, e a partir daí foi possível chegar a conclusões. Primeiramente foi constatado que os problemas de qualidade de energia elétrica presentes no forno de aquecimento a indução são principalmente distorções harmônicas. Nota-se que as distorções harmônicas de tensão não se apresentam tão impactantes no contexto geral. Assim, identificou-se que as distorções harmônicas mais presentes são as harmônicas de corrente de ordem $6n \pm 1$.

Palavras-chave: Forno a indução. Qualidade de energia elétrica. Distorções harmônicas. Analisador de energia.

ABSTRACT

SCOLARI, Bruno S.. CERQUEIRA, Fernando B.. KRAVETZ, Peterson L.. Characterization of the Power Quality Problems Caused For a Induction Furnace Induction. 2013. 115 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

By presenting energy-efficient, high heating rate, low level of oxidation of the material processed, low emission of dust, noise and fumes and provide a better working environment and easy control of the production process, induction heating has become a solution increasingly viable in the steel sector. The same elements in the area of power electronics that made possible the extensive use of inductive heating are also responsible for significant problems within the electric power quality, and that is the field in which this paper focuses. This paper presents a theoretical initially contextualizing and providing information about the heating furnace induction, and then, addressing aspects of power quality. Furthermore, the theoretical addressed the technical norms regarding the indices of electricity quality. The next step involved measurements and verifications in a heating furnace induction to identify and quantify the problems of power quality gifts. From these measurements, the data were organized in the form of charts and / or tables, and from there it was possible to reach conclusions. First it was found that the problems of power quality present in the induction heating furnace are mainly harmonic distortions. Note that the harmonic voltage distortion is not present so striking in the general context. Thus, it was found that the harmonic distortions are more present current harmonics of order $6n \pm 1$.

Keywords: Induction furnace. Electric power quality. Harmonic distortions. Energy analyzer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da eficiência do aquecimento indutivo	20
Figura 2 – Custos do aquecimento indutivo.....	21
Figura 3 – Tempos de aquecimento	24
Figura 4 – Forno a indução de forjamento parcial	25
Figura 5 – Bobina carregada com tarugo de metal.....	25
Figura 6 – Forno a indução de fusão	26
Figura 7 – Esquema físico de um forno de indução.....	28
Figura 8 – Esquema Elétrico de um Forno a Indução.....	29
Figura 9 – Relação potência – frequência	30
Figura 10 – Relação potência - frequência	30
Figura 11 – Relação potência - frequência	32
Figura 12 – Aplicação de componentes no inversor de frequência	32
Figura 13 – Forno de aquecimento indutivo	34
Figura 14 – Dados de placa.....	35
Figura 15 – Dados de placa.....	36
Figura 16 – Bobina de carga	37
Figura 17 – Custos das perdas financeiras estimado para parada de até um minuto.....	39
Figura 18 – Representação da decomposição de um sinal distorcido.....	44
Figura 19 – Forma de onda de corrente gerada por uma fonte chaveada....	46
Figura 20 – Espectro harmônico de corrente gerado em fonte chaveada	47
Figura 21 – Forma de onda em uma carga linear.....	50
Figura 22 – Forma de onda em uma carga não linear.....	50
Figura 23 – Transformador para confinamento de 3ª harmônica e suas múltiplas	57
Figura 24 – Transformador para confinamento de 5ª e 7ª harmônica e suas múltiplas	59
Figura 25 – Limites de queda de tensão.....	65
Figura 26 – Detalhe da Entrada de Energia	70
Figura 27 – Detalhe da Cabine dos Transformadores	71
Figura 28 – Detalhe do QGBT	73
Figura 29 – Detalhe do Forno a Indução em Funcionamento.....	74
Figura 30 – Detalhe da Bobina de Aquecimento	74

Figura 31 – Banco de Capacitores Desativado	75
Figura 32 – Detalhe do Antigo Forno a Gás	75
Figura 33 – Detalhe do Analisador de Energia	76
Figura 34 – Detalhe dos Sensores de Corrente	77
Figura 35 – Detalhe dos Equipamentos de Proteção Individual	77
Figura 36 – Detalhe da Conexão do Analisador de Energia.....	78
Figura 37 – Detalhe da Conexão dos Sensores de Corrente	79
Figura 38 – Detalhe da Conexão dos Pontos de Tensão	80
Figura 39 – Gráfico da Potência Ativa dos Processos de Aquecimento.....	81
Figura 40 – Gráfico da Potência Ativa e Reativa	83
Figura 41 – Gráfico do Fator de Potência.....	83
Figura 42 – Gráfico dos Níveis de Tensão de Fase.....	85
Figura 43 – Gráfico dos Níveis de Tensão de Linha.....	86
Figura 44 – Gráfico do Desequilíbrio de Tensão	87
Figura 45 – Gráfico dos Níveis de Corrente	88
Figura 46 – Gráfico das Distorções Harmônicas Totais de Tensão.....	89
Figura 47 – Espectro de Frequência de Tensão – Fase A – Valores Máximos	92
Figura 48 – Espectro de Frequência de Tensão – Fase B – Valores Máximos	92
Figura 49 – Espectro de Frequência de Tensão – Fase C – Valores Máximos	93
Figura 50 – Gráfico das Distorções Harmônicas Totais de Corrente.....	96
Figura 51 – Forma de Onda de Corrente – Fase A	97
Figura 52 – Forma de Onda de Corrente – Fase B	98
Figura 53 – Forma de Onda de Corrente – Fase C	98
Figura 54 – Espectro de Frequência de Corrente – Fase A – Valores Máximos	101
Figura 55 – Espectro de Frequência de Corrente – Fase B – Valores Máximos	101
Figura 56 – Espectro de Frequência de Corrente – Fase C – Valores Máximos	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais causas dos fenômenos eletromagnéticos	41
Tabela 2 – Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos de sistemas elétricos	42
Tabela 3 – Ordem, frequência e sequência das harmônicas.....	45
Tabela 4 – Limites de distorção da tensão para redes industriais – IEC 61000-2-4	69
Tabela 5 – Comparação dos Níveis de Tensão Registrados com as Normas Correspondentes	85
Tabela 6 – Comparação dos Níveis de Desequilíbrio de Tensão com a Norma EN 50160	87
Tabela 7 – Comparação da DHTt com as Norma Correspondentes	90
Tabela 8 – Comparação das Componentes Harmônicas de Tensão com as Normas	91
Tabela 9 – Comparação da DHTi com a Norma IEEE 519.....	96
Tabela 10 – Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente com as Normas	100

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	“Alternate current” (Corrente alternada)
BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEN	Comitê Europeu de Normatização
COCEL	Companhia Campolarguense de Energia
DC	“Direct current” (Corrente contínua)
DHT	Distorção harmônica total
DR	Dispositivo diferencial residual
EN	Normas europeias
FEM	Força eletromotriz
IEC	“International Electrotechnical Commission” (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEEE	“Institute of Electrical and Electronic Engineers” (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IGBT	“Insulated Gate Bipolar Transistor” (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
MT	Média tensão
NBR	Normas técnicas brasileiras
NEMA	National Electrical Manufacturers Association of USA
PCC	Ponto de conexão de comum

PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de energia elétrica
QGBT	Quadro geral de baixa tensão
TDD	“Total demand distortion” (Distorção total de demanda)
THD	“Total harmonic distortion” (Distorções harmônicas totais)
UPS	“Uninterruptible power supply” (Fonte de alimentação ininterrupta)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	TEMA.....	14
1.1.1	Delimitação do Tema	14
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	FORNOS DE AQUECIMENTO A INDUÇÃO.....	19
2.1	INTRODUÇÃO	19
2.2	APLICAÇÕES	21
2.3	VANTAGENS.....	23
2.4	FUNDAMENTOS FÍSICOS	26
2.5	FAIXAS DE POTÊNCIAS E FREQUÊNCIAS.....	30
2.6	FONTES DE ALIMENTAÇÃO.....	31
2.7	IMPACTOS NA REDE ELÉTRICA.....	33
2.8	FORNO EM ESTUDO.....	34
2.8.1	Características Gerais.....	34
2.8.2	Topologia do circuito elétrico do forno.....	35
3	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	38
3.1	INTRODUÇÃO	38
3.2	DISTÚRBIOS ELÉTRICOS.....	40
3.3	DISTORÇÕES HARMÔNICAS	43

3.3.1	Definição	43
3.3.2	Ordem, frequência e sequência das harmônicas	44
3.3.3	Espectro harmônico	46
3.3.4	Taxa de distorção harmônica total (DHT).....	47
3.3.5	Cargas lineares e não lineares.....	48
3.3.6	Consequências das distorções harmônicas	51
3.3.7	Soluções para o problema dos harmônicos	55
3.4	INTER-HARMÔNICA	60
3.5	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO.....	61
4	NORMATIZAÇÃO.....	63
4.1	DISTÚRBIOS DE TENSÃO.....	63
4.1.1	PRODIST - Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.....	63
4.1.2	EN 50160 – Power Quality Standard.....	63
4.1.3	IEC Série 61000 – Compatibilidade Eletromagnética.....	64
4.1.4	NBR 5410 de 2004.....	64
4.2	DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO	66
4.2.1	PRODIST - Módulo 8 – Qualidade De Energia Elétrica	66
4.2.2	EN 50160 – Power Quality Standard.....	66
4.3	HARMÔNICOS	66
4.3.1	PRODIST - Módulo 8 – Qualidade De Energia Elétrica	66
4.3.2	IEEE – 519 – 1992 – Recomendação da IEEE	67
4.3.3	EN 50160 – Power Quality Standard.....	67
4.3.4	IEC 61000-2-2.....	68
4.3.5	IEC 61000-2-4.....	68
4.3.1	IEC 61000-3-4.....	69
5	MEDIÇÕES, GRÁFICOS E CÁLCULOS	70
5.1	VISÃO GERAL DAS INSTALAÇÕES.....	70

5.2	METODOLOGIA	76
5.2.1	Equipamentos Utilizados	76
5.2.2	Conexão do Analisador de Energia	78
5.2.3	Parâmetros da Medição e Convenções de Análise	80
5.3	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	82
5.3.1	Potências e Fator de Potência	82
5.3.2	Níveis de Tensão	84
5.3.3	Desequilíbrio de Tensão	86
5.3.4	Níveis de Corrente	88
5.3.5	Distorções Harmônicas de Tensão	89
5.3.6	Distorções Harmônicas de Corrente	94
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO A.....	109
	ANEXO B.....	110
	ANEXO C	111
	ANEXO D	112
	ANEXO E.....	113
	ANEXO F	114
	ANEXO G	115
	ANEXO H	116

1 INTRODUÇÃO

A natureza das matérias-primas utilizadas nos processos industriais depende principalmente do segmento industrial a que pertence a indústria e da natureza do produto final. Porém, uma matéria-prima está presente e assume papel essencial na maioria das indústrias: a energia elétrica.

Assim como com as outras matérias-primas, a partir do ano de 2003, após as mudanças do modelo do Setor Elétrico Brasileiro, as indústrias começaram a poder escolher seus fornecedores de energia elétrica. Contudo, algumas características da energia elétrica a diferenciam das outras matérias-primas, como o fato de que ela deve estar disponível continuamente, pois não pode ser armazenada em quantidades significativas. Além disso, não podemos verificar sua qualidade antes de ser utilizada.

Deste modo, a energia elétrica pode ser considerada a epítome da filosofia “*just in time*” (na hora certa), em que componentes são entregues por um fornecedor confiável e aprovado para uma linha de produção no ponto e no momento exato de uso, sem exigências de inspeção de conformidade prévia. Para que este processo seja bem sucedido, é necessário ter um bom controle da especificação dos componentes, uma confiança alta de que o fornecedor pode produzir e entregar conforme a especificação e um conhecimento do comportamento global do produto com componentes dentro dos limites de tolerância exigidos (CHAPMAN, 2002).

Diversos aspectos permitem a avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica. Entre eles podemos citar a continuidade do fornecimento, nível de tensão, oscilações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas de tensão e interferência em sistemas de comunicação (L. M. MEHL, 2005).

Na ocorrência de falhas no processo industrial causadas pela má qualidade de energia elétrica, a indústria em geral reclama por um melhor serviço por parte da concessionária, para que atenda além dos parâmetros estabelecidos por lei, os parâmetros necessários para o desenvolvimento do processo.

Muitas vezes a concessionária tem culpa pela baixa qualidade da energia elétrica utilizada pelo processo industrial, mas em outros casos, o próprio

consumidor pode deteriorar a qualidade da energia elétrica dentro de suas instalações.

Quando a má qualidade de energia elétrica é de origem interna, cabe à indústria identificar, corrigir e prevenir esse tipo de situação. Esse problema pode ser causado principalmente por instalações elétricas precárias, equipamentos elétricos defeituosos ou pela própria natureza da carga elétrica.

As cargas elétricas instaladas nas industriais não possuem as mesmas características elétricas quando comparadas há algumas décadas atrás, quando praticamente todas elas eram lineares. Isso tem ocorrido em função do desenvolvimento da eletrônica de potência e do avanço tecnológico dos dispositivos semicondutores, microprocessadores e microcontroladores (O SETOR ELÉTRICO, Setembro 2012).

Reconhece-se que a principal característica dessas novas cargas é que elas distorcem as formas de onda de corrente e tensão, deixando-as não senoidal (O SETOR ELÉTRICO, Setembro 2012). Esse fato acarreta grandes preocupações com a qualidade da energia elétrica, pois afetam inúmeros equipamentos elétricos nas indústrias, prejudicando a eficiência e continuidade do processo industrial.

Dentre as cargas não lineares, os inversores de frequência assumem um papel de destaque nas instalações elétricas industriais. Ao mesmo tempo em que são essenciais para diversos processos industriais, são um dos principais causadores de distorções harmônicas nas indústrias.

Esses dispositivos são usados em muitas aplicações industriais, incluindo controles de velocidade para motores síncronos e de indução, aquecimento por indução, fontes de alimentação para aeronaves, fontes de alimentação de funcionamento contínuo (*uninterruptible power supplies* – UPS) e transmissão em alta tensão DC (AHMED, 2000).

1.1 TEMA

Qualidade de energia elétrica em um forno a indução.

1.1.1 Delimitação do Tema

Este estudo aborda os problemas de qualidade da energia elétrica causados por um forno de aquecimento a indução em uma forjaria.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

As indústrias buscam soluções cada vez mais econômicas e confiáveis para seus processos industriais existentes, visando uma maior qualidade do produto final.

Neste contexto, foram inseridos, no setor da siderurgia, os fornos de aquecimento a indução. Por ser um processo de aquecimento sem contato, não ocorre contaminação do material a ser tratado. Isso proporciona melhor qualidade do produto final e um menor custo de energia elétrica quando comparado com outros métodos de aquecimento e tratamento térmico.

O processo de aquecimento a indução requer uma corrente elétrica de alta frequência que circulará por uma bobina. Essa corrente é gerada através de um circuito retificador em conjunto com um circuito inversor de frequência, o qual converte potência DC em potência AC com a frequência de tensão ou corrente de saída desejada.

Tanto os circuitos retificadores quanto os circuitos inversores de frequência são responsáveis por significativas deformações nas formas de onda de tensão e corrente de entrada. Identificar e quantificar essas deformações, assim como os outros problemas no âmbito da qualidade de energia, é essencial para que se possam tomar medidas de mitigação a fim de se corrigir ou minimizar o problema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Identificar e caracterizar os problemas relativos à qualidade de energia elétrica, causados por fornos de aquecimento a indução.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar o referencial teórico a respeito de qualidade de energia, fornos a indução e indução magnética;
- efetuar uma apresentação a respeito do modelo de forno a indução a ser utilizado nas medições e estudos;
- efetuar uma breve apresentação a respeito das instalações elétricas da empresa, contextualizando o forno de aquecimento a indução em relação às outras cargas relevantes;
- efetuar medições elétricas na entrada do forno a indução;
- representar através de gráficos todas as grandezas registradas a fim de se obter uma melhor visualização destas;
- caracterizar e quantificar os problemas relativos à qualidade de energia causados pelo forno de aquecimento a indução estudado.

1.4 JUSTIFICATIVA

A qualidade de energia é um domínio complexo, tratando uma dúzia de áreas de problemas, para as quais existe um número muito maior de soluções. No momento, a maior parte dos locais com utilização intensiva de energia sofre com certo grau de deficiência na qualidade de energia elétrica (DE KEULENAER, 2002).

Para se tomar medidas de mitigação dos efeitos causados pela má qualidade de energia, é necessária uma análise quantitativa das grandezas elétricas envolvidas. Saber o momento exato dos afundamentos de tensão, picos de corrente, nível de distorções harmônicas e espectro de frequência de tensão e corrente são fundamentais para o desenvolvimento de medidas que amenizem o impacto da má qualidade de energia no processo industrial.

Convém observar que não existe uma solução única para problemas de qualidade de energia. Um mesmo problema pode ser causado por diversos fatores, e cada fator requer uma medida de mitigação diferente. Porém, uma determinada causa de problema, costuma manifestar seus efeitos de forma semelhante na maioria dos locais em que ela esteja presente.

Assim, a análise dos problemas no âmbito da qualidade de energia causados por um determinado forno de aquecimento a indução, além de serem essenciais para a correção do problema deste forno em específico, podem ser utilizadas como base para estudos de qualidade de energia em equipamentos semelhantes.

As conclusões levantadas podem servir de diretrizes para medidas de mitigação dos problemas de qualidade de energia causados por fornos a indução em consumidores que venham sofrendo as consequências de uma má qualidade de energia elétrica.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O referencial teórico é uma etapa importante para a pesquisa. Foram buscados livros, monografias, artigos, reportagens, vídeos, revistas, além de sites referentes ao tema de pesquisa, a saber: qualidade de energia elétrica, fornos de aquecimento a indução, indução magnética. Foram abordados os principais problemas de qualidade de energia elétrica causados por fornos de aquecimento a indução. Esse material foi necessário para uma visão global do tema pesquisado e elaboração de raciocínios sistêmicos e conclusões.

A seguir, foi feito o trabalho em campo, que consistiu na medição de grandezas elétricas durante o funcionamento do forno a indução. As medições foram realizadas através de um analisador de energia RE6000 de fabricação da Embrasul. Foi considerada uma ampla gama de grandezas elétricas: potências ativas, reativas e aparentes, níveis de tensão, variações de tensão de curta duração, desequilíbrios de tensão, corrente elétrica, fator de potência, frequência da linha, distorções harmônicas totais de tensão e de corrente e espectro de frequência de distorções harmônicas de tensão e corrente. Foram feitas medições com intervalos de integração de cinco décimos de segundos. Cada processo de cozimento do forno leva em torno de dois minutos e meio, assim o tempo de medição foi calculado de forma que abranja pelo quinze processos de cozimento a fim de se obter um padrão de resultados.

Após as medições terem sido concluídas, iniciou-se a análise dos dados. Os valores registrados foram convertidos pelo analisador de energia em forma de arquivo do *Microsoft Excel*. Com os resultados computados foram traçados gráficos para uma melhor visualização das grandezas estudadas. Assim, os valores das grandezas registradas puderam ser comparados com valores padrões aceitáveis pelas normas cabíveis. Também foi traçado o espectro de frequência de tensão e corrente a fim de se identificar em quais frequências ocorrem as maiores distorções harmônicas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 – Introdução com apresentação e delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos principais, justificativa, metodologia e referências.

Capítulo 2 – Fornos de Aquecimento a Indução.

Capítulo 3 – Qualidade de Energia Elétrica.

Capítulo 4 – Normatização.

Capítulo 5 – Medições, gráficos e cálculos.

Capítulo 6 – Considerações finais.

Referências.

2 FORNOS DE AQUECIMENTO A INDUÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de fornos de aquecimento a indução começa em Michael Faraday, que enunciou o princípio da indução eletromagnética no início do século XIX. No entanto, somente no final de 1870 o engenheiro britânico Sebastian de Ferranti começou experimentos aplicando a teoria de Faraday para aquecimento de metais. Em 1890, Edward Allen Colby patenteou o primeiro forno de indução para derretimento de metais. O primeiro uso prático foi em 1900 em Gysinngge (Suécia) por Kjellin. O primeiro forno de indução trifásico foi construído na Alemanha em 1906 por Röchling-Rodenhauser. Em 1907, foi produzido o primeiro aço em um forno de indução nos Estados Unidos (GANDHEWAR, 2011).

Nestes projetos iniciais, correntes elétricas eram induzidas diretamente à carga, geralmente em frequência de linha simples (60 Hz). Estes fornos continham fornalhas em forma de anel, onde mantinham o material fundido.

Em 1900, os fornos de fusão de anel começaram a ser substituídos pelo forno desenvolvido por Northrup, que consiste em um cadinho em forma de cilindro e uma fonte de alimentação de alta frequência através de um centelhador. Esta aplicação estava limitada pela máxima frequência gerada pelo centelhador. Em 1922 essa limitação foi atenuada com o desenvolvimento de grupos motor gerador que poderiam fornecer uma potência de várias centenas de quilowatts a uma frequência de até 960Hz (ZINN, 1988).

Foi no ano de 1960 que os grupos motor gerador foram substituídos por conversores de frequência de estado sólido, gerando sinais em média frequência.

Após a larga aceitação do aquecimento a indução para a fundição de metais, outras aplicações foram estudadas e desenvolvidas no campo da siderurgia. Em 1927 o aquecimento a indução começou a ser utilizado para o endurecimento da superfície do aço em rolamentos, mancais e eixos. Está é uma prática até hoje

utilizada nas forjarias para aumentar a resistência à fadiga e ao desgaste das peças produzidas.

A segunda guerra mundial proporcionou um grande impulso para a utilização da tecnologia de aquecimento por indução, particularmente no tratamento térmico de componentes de artilharia e projéteis. Também se verificou que os componentes dos tanques de guerra, como pinos, ligas e rodas dentadas podem ser endurecidos de forma mais eficaz pelo aquecimento indutivo (ZINN, 1988).

Nos últimos anos, as aplicações de tratamento térmico indutivo aumentaram a tal ponto que hoje, a maioria dos engenheiros nas indústrias metalúrgicas são familiarizados com as aplicações existentes. Outros segmentos industriais já estudam o princípio do aquecimento a indução para aplicação em seus processos industriais (ZINN, 1988).

Muitas das aplicações recentes do aquecimento indutivo foram possíveis graças ao desenvolvimento da eletrônica de potência, que tem trabalhado no desenvolvimento e aprimoramento das fontes de alimentação dos equipamentos. A figura 1 ilustra o aumento da eficiência do processo retificação e inversão de frequência. De modo análogo a figura 2 ilustra a redução do custo total de produção ao longo dos anos com a introdução de novas tecnologias.

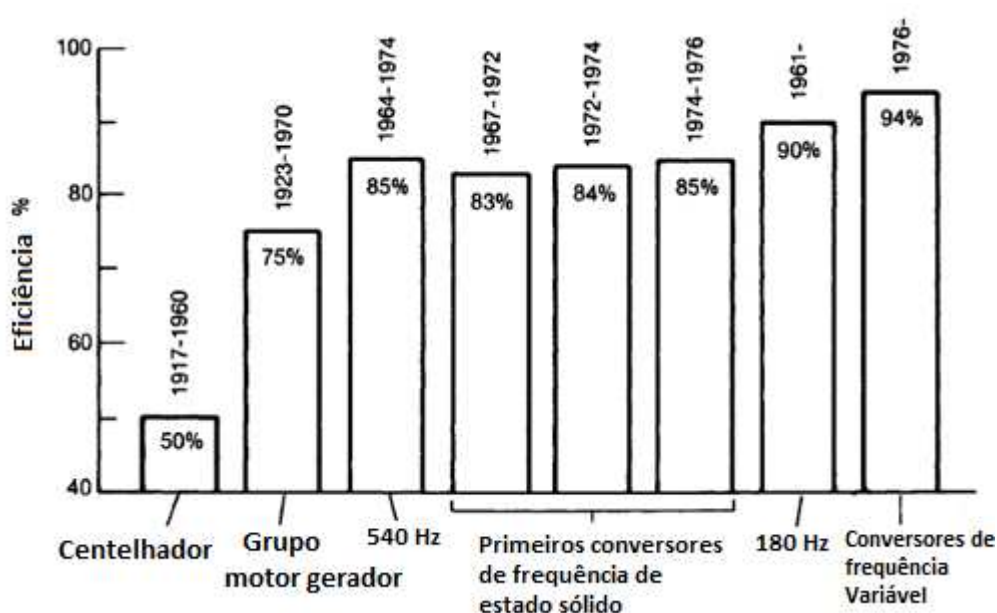


Figura 1 – Evolução da eficiência do aquecimento indutivo

Fonte: ZINN (1988).

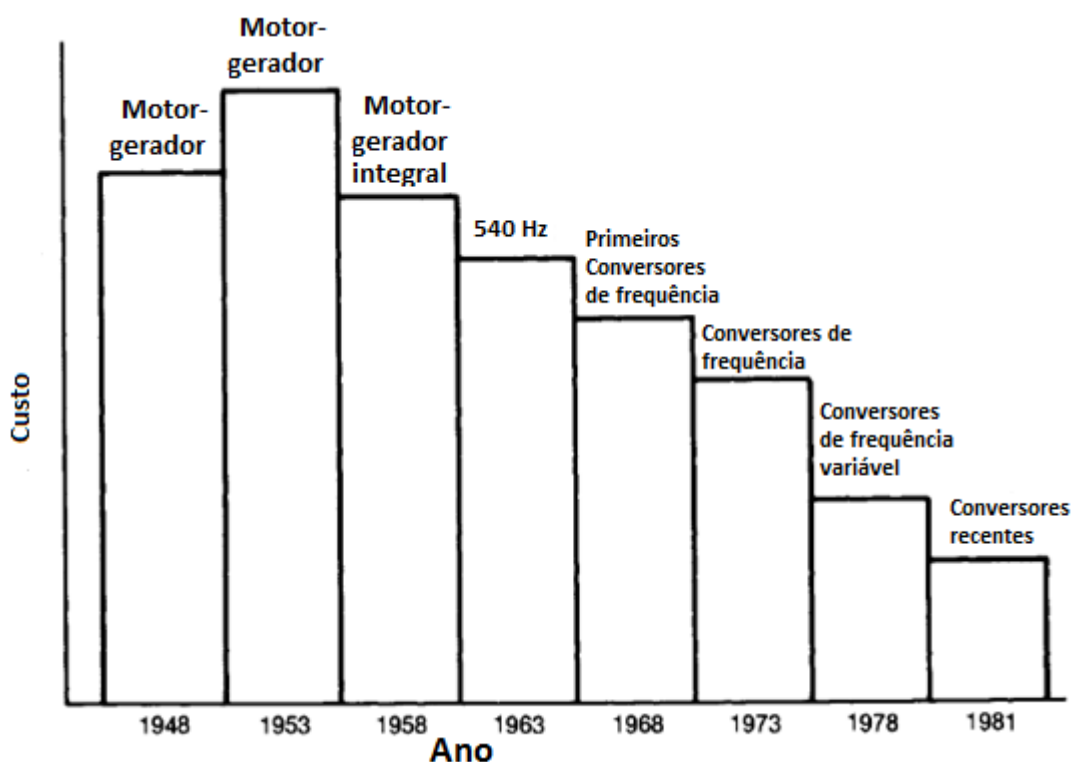


Figura 2 – Custos do aquecimento indutivo

Fonte: ZINN (1988).

2.2 APLICAÇÕES

Os equipamentos de aquecimento indutivo são utilizados em maior quantidade nas indústrias de processamento de metais. Seus principais usos englobam os processos de fusão, tratamento térmico, endurecimento de metais e solda. Outras aplicações como cura da pintura, colagem adesiva e fabricação de semicondutores já tem soluções com o uso do aquecimento indutivo. De modo detalhado, as aplicações do aquecimento a indução englobam (ZINN, 1988):

- Pré-aquecimento antes da metalurgia: o aquecimento indutivo antes dos processos metalúrgicos é bem aceito nas forjarias e indústrias de extrusão, onde é feito o pré-aquecimento de aços. Ligas de alumínio, e metais específicos, tais como titânio e ligas de níquel. Para o aço, a elevada e rápida taxa de aquecimento minimiza as perdas de materiais, aumenta a taxa de produção e melhora a qualidade do produto final;

- tratamento térmico: o aquecimento por indução utilizado na têmpera, endurecimento e recozimento do aço. A principal vantagem é a capacidade de controlar a zona que é tratada termicamente. A têmpera é o método mais comum de tratamento térmico indutivo, ele melhora a resistência, desgaste e propriedades de fadiga dos aços. Menos comum é o processo de recozimento indutivo, que restaura as propriedades de ductilidade na fabricação de aços, ligas de alumínio e outros metais;
- fusão: o processo de indução é frequentemente utilizado para derreter aço de alta qualidade e ligas de metais não ferrosos. O processo de fusão por indução resulta em um fundido mais uniforme com maior resistência;
- solda e brasagem: a solda por indução oferece economias substanciais de energia elétrica, pois o calor está localizado na junção da solda. Seu uso é frequente em linhas de produção que precisam soldar componentes a uma alta velocidade. Dependendo do processo, a brasagem também pode ser feita através de processos indutivos;
- cura de revestimentos orgânicos: a indução é utilizada para curar revestimentos orgânicos, tais como tintas aplicadas em superfícies metálicas. Por este meio, a cura ocorre de dentro para fora, minimizando a tendência para a formação de defeitos de revestimento. Uma aplicação típica é a secagem da tinta em folhas de metal;
- refluxo de estanho: revestimentos de estanho eletroliticamente depositados em chapa de aço possuem um revestimento não uniforme. O aquecimento indutivo da chapa a uma temperatura de 230°C provoca um refluxo do revestimento de estanho, resultando em uma aparência brilhante e cobertura uniforme;
- fabricação de semicondutores: a manipulação de cristais de germânio e silício muitas vezes depende do aquecimento indutivo. A refinação, nivelamento, dopagem e deposição epitaxial de materiais semicondutores também fazem uso do processo de indução.

2.3 VANTAGENS

Antes do desenvolvimento do aquecimento indutivo, fornos a gás e óleo combustível forneciam os meios primários de aquecimento de metais e não metais. O aquecimento a indução apresenta diversas vantagens em relação aos métodos de aquecimento convencionais.

O aquecimento indutivo apresenta uma grande eficiência energética, com alta taxa de aquecimento e reduzido nível de oxidação do material processado, possibilitando melhores condições de trabalho e controle do processo (RUDNEV, 2002). O que torna esse método de aquecimento uma das formas mais econômicas de fabricação do aço (ZAMORA, 2005). Outra vantagem se deve ao fato de que muitos equipamentos de aquecimento a indução não emitem poeira, ruídos e gases durante sua operação. Esse tipo de aquecimento melhora a flexibilidade operacional e o rendimento da produção. Por não existir contato entre o metal a ser tratado e o forno, não há contaminação desse material. Além disso, na maioria das situações possui um menor consumo de energia elétrica se comparado a outros tipos de aquecimento (EPRI, 1999).

O desenvolvimento do calor, através da indução, no interior da peça de trabalho, proporciona taxas de aquecimento mais altas do que a de convecção e de radiação nos processos de aquecimento convencionais.

Fornalhas convencionais contêm grande quantidade de material refratário, que deve ser aquecido durante o acionamento do forno, o que provoca uma grande inércia térmica. O aquecimento indutivo elimina esse problema, proporcionando um arranque muito mais rápido. Isso possibilita o desligamento do fornecimento de energia elétrica quando o forno não estiver sendo usado, gerando uma economia de energia. Diferentemente dos fornos convencionais que devem ser alimentados continuamente.

Em se tratando do meio ambiente, a fusão a indução produz apenas uma fração dos gases que resultam da fusão em um forno de arco elétrico (vapores de metais pesados e partículas) ou em um forno de cúpula (ampla variedade de

emissões de gases e partículas indesejáveis, como resultado de materiais menos resistivos) (GANDHEWAR, 2011).

A figura 3 compara o tempo de aquecimento de uma barra de ferro de diferentes diâmetros pelo método de aquecimento indutivo e por uma fornalha a gás.

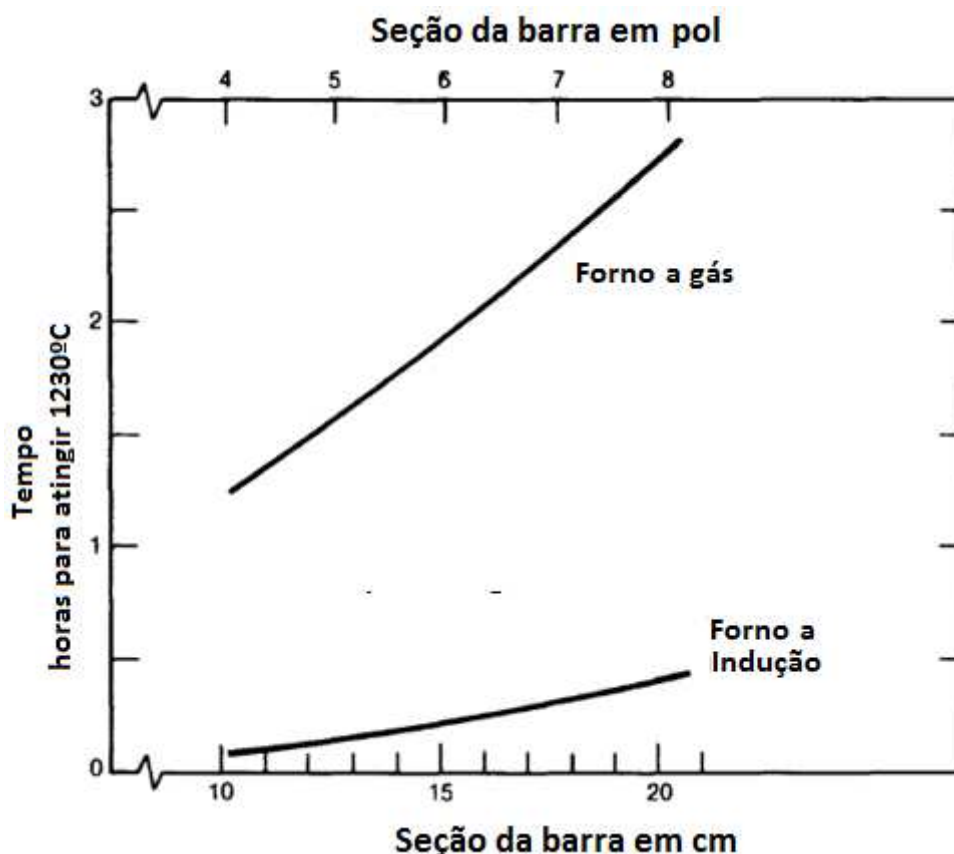


Figura 3 – Tempos de aquecimento

Fonte: ZINN (1988).

Desde os anos 1970, a indução tem sido o principal método de fusão em fundições de metais não ferrosos e uma ferramenta importante em fundições de ferro (EPRI, 1999). Uma nova geração de fornos de indução industriais vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos 25 anos. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, os fornos atualmente possuem retificadores controlados, que são capazes de gerenciar tanto a frequência quanto a intensidade da corrente necessária para a fusão, sendo capazes de atingir uma eficiência elétrica superior a 97%, uma melhoria substancial em relação à eficiência de 85% dos fornos de indução da década de 1970 (GANDHEWAR, 2011).

A figura 4 ilustra um forno de aquecimento a indução de forjamento parcial, e o detalhe da bobina aquecendo um tarugo de metal está representado na figura 5. Na figura 6 pode-se observar um forno a indução fundindo o metal.



Figura 4 – Forno a indução de forjamento parcial
Fonte: JAMO (2010).

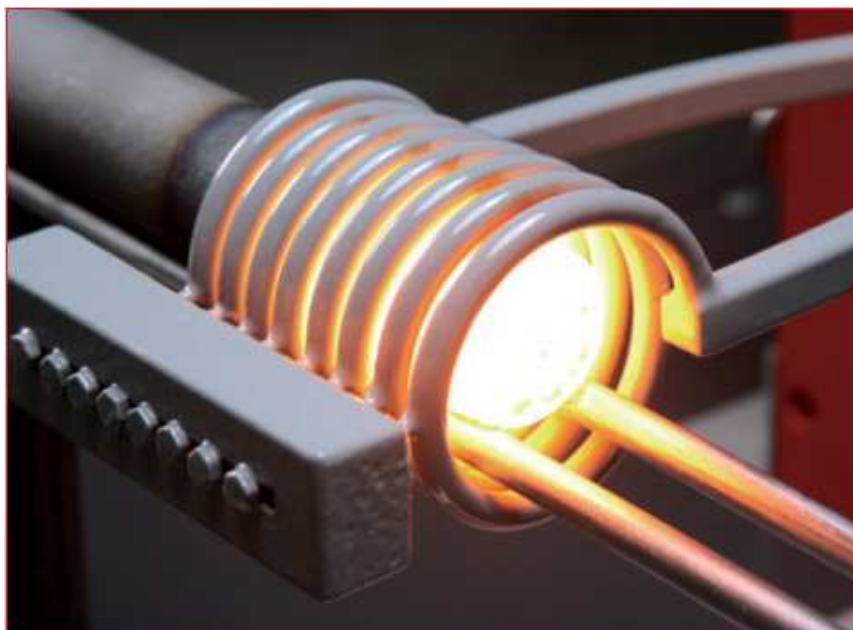


Figura 5 – Bobina carregada com tarugo de metal
Fonte: JAMO (2010).



Figura 6 – Forno a indução de fusão

Fonte: EPRI (1999).

As novas tecnologias melhoraram o fornecimento de energia para o sistema de indução, introduziram sistemas de recuperação de calor e controle geral do sistema. Isso fez com que a utilização desse tipo de aquecimento aumentasse em mais de 20% ao ano, tornando-se a tecnologia de maior crescimento na produção de metais. Com o tempo, a indução pode até mesmo superar o uso dos fornos convencionais elétricos e a arco, tanto em toneladas de produção quanto em quilowatt horas de uso de energia (EPRI, 1999).

2.4 FUNDAMENTOS FÍSICOS

O físico e químico inglês Michael Faraday descobriu que uma força eletromotriz e uma corrente podem ser induzidas em uma espira, fazendo variar o fluxo magnético que atravessa a espira (HALLIDAY, 2009). A lei de Faraday, também chamada de lei da indução eletromagnética, introduz que “A fem em uma

espira fechada é dada pela taxa de variação do fluxo magnético, com o sinal negativo, através da área delimitada pela espira” (SEARS, 2009).

O módulo do campo magnético \vec{dB} produzido no ponto P por um elemento de corrente $i\vec{ds}$ é dado pela equação 1 (HALLIDAY, 2009).

$$dB = \frac{\mu_0 i \cdot ds \cdot \text{sen}\theta}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Onde θ é o ângulo entre as direções de \vec{ds} e \hat{r} , o vetor que liga ds a P , e μ_0 é a constante permeabilidade do vácuo.

Para um elemento de área infinitesimal \vec{dA} em uma densidade de fluxo magnético \vec{B} , o fluxo magnético $d\Phi_B$ através da área é dado pela equação 2.

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{dA} = B_{\perp} dA = B \cdot dA \cdot \text{cos}\varnothing \quad (2)$$

Onde B_{\perp} é o componente de \vec{B} perpendicular à superfície do elemento de área e \varnothing é o ângulo entre \vec{B} e \vec{dA} . Assim, a lei de Faraday pode ser exemplificada pela equação 3 (SEARS, 2009).

$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

Onde ε é força eletromotriz induzida.

Um solenoide, no qual circula uma corrente elétrica contínua, produz um campo magnético constante, no entanto, ao alimentar a bobina por corrente elétrica alternada o campo magnético passa a ser variado, pois o módulo e a direção da corrente variam com o tempo. Desta forma, uma espira condutora de corrente elétrica colocada no interior desse solenoide, estará sujeita à ação de um fluxo magnético variável e conseqüentemente sujeita a circulação de corrente elétrica.

Substituindo essa espira condutora por uma placa condutora maciça ainda haverá circulação de corrente no interior da placa, porém, os elétrons de condução responsáveis pela corrente induzida não seguem todos a mesma trajetória, como no caso da espira. Em vez disso, circulam no interior da placa como se fizessem parte

de um remoinho. Uma corrente desse tipo é chamada de corrente parasita (HALLIDAY, 2009), ou ainda Corrente de Foucault.

Devido à resistência elétrica da placa condutora e a histerese magnética, a energia elétrica contida na placa é convertida em energia térmica, ocasionando um aumento de temperatura da placa.

O funcionamento do forno de aquecimento a indução, esquematizado na figura 7, baseia-se nesse princípio físico. O metal a ser fundido é colocado em um cadinho envolto por uma bobina. A corrente que circula na bobina é uma corrente alternada, cuja amplitude e sentido variam com o tempo. Assim, o módulo e a orientação do campo magnético produzido pela corrente variam com o tempo. Este campo magnético variável produz correntes parasitas no metal e a energia elétrica é convertida em energia térmica, aumentando a temperatura do metal até o ponto de fusão (HALLIDAY, 2009).

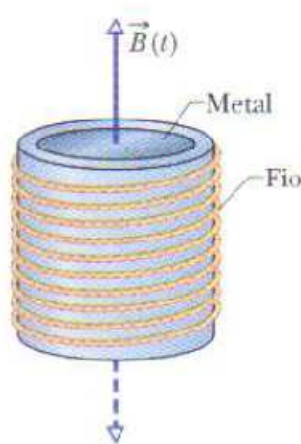


Figura 7 – Esquema físico de um forno de indução

Fonte: HALLIDAY (2009).

O aquecimento por indução depende de dois mecanismos de dissipação de energia para fins de aquecimento. São as perdas de energia devido ao efeito Joule e as perdas de energia associadas à histerese magnética. O primeiro destes é o único mecanismo de geração de calor em materiais não magnéticos (por exemplo, alumínio, cobre, aços inoxidáveis e aço de carbono acima da temperatura Curie) e o principal mecanismo de aquecimento para metais ferromagnéticos (por exemplo, os

aços de carbono abaixo da temperatura de Curie). O segundo mecanismo é menos importante, porém contribui para a geração de calor por indução para essa última classe de materiais (ZINN, 1988).

A temperatura máxima que o material no interior da bobina conseguirá alcançar vai depender da quantidade de energia térmica gerada. A quantidade de energia térmica dependerá da intensidade e da taxa de variação do campo magnético, que por sua vez será proporcional à intensidade e a frequência da corrente elétrica na bobina.

O sistema elétrico brasileiro fornece uma corrente elétrica alternada de 60Hz de frequência. No entanto, para que a variação do campo magnético seja suficiente para causar a fusão do material a ser tratado é necessária uma corrente elétrica de frequência na ordem de kHz.

Para se atingir a alta frequência desejada, é necessário que o forno de aquecimento a indução possua um circuito inversor de frequência associado a um circuito retificador, como ilustrado na figura 8.

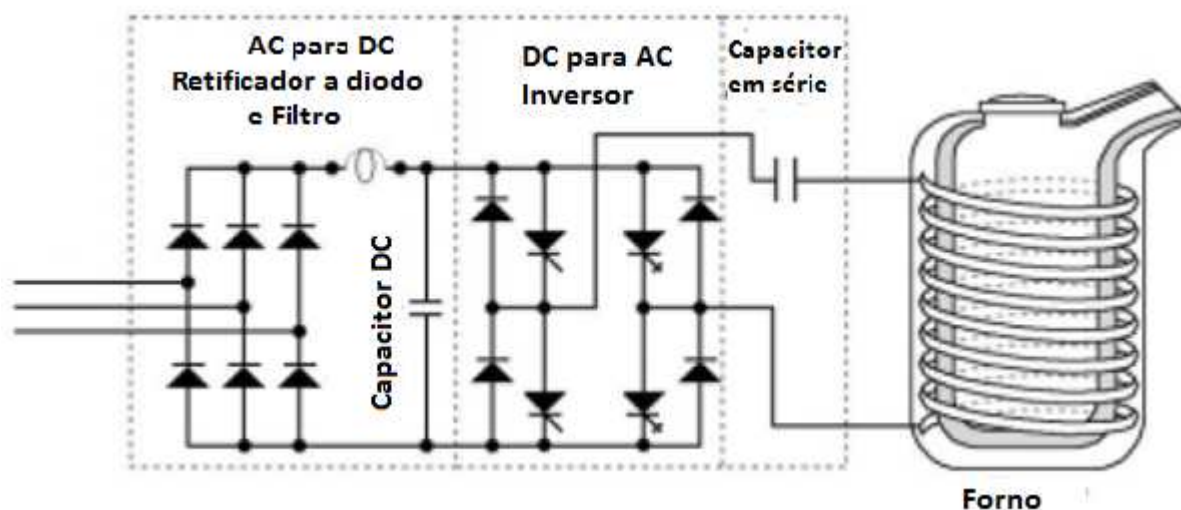


Figura 8 – Esquema Elétrico de um Forno a Indução

Fonte: EPRI (1999).

2.5 FAIXAS DE POTÊNCIAS E FREQUÊNCIAS

Conhecer o processo industrial para o qual o aparelho será destinado é de extrema importância, uma vez que, a aplicação específica irá influenciar na frequência, potência, tensão da bobina de carga, corrente da bobina de carga e fator de potência. A figura 9 ilustra a potência versus a frequência, relacionando-as com as aplicações mais comuns de aquecimento indutivo. De modo análogo, a figura 10 relaciona a potência versus corrente com as principais operações de formação de metais.

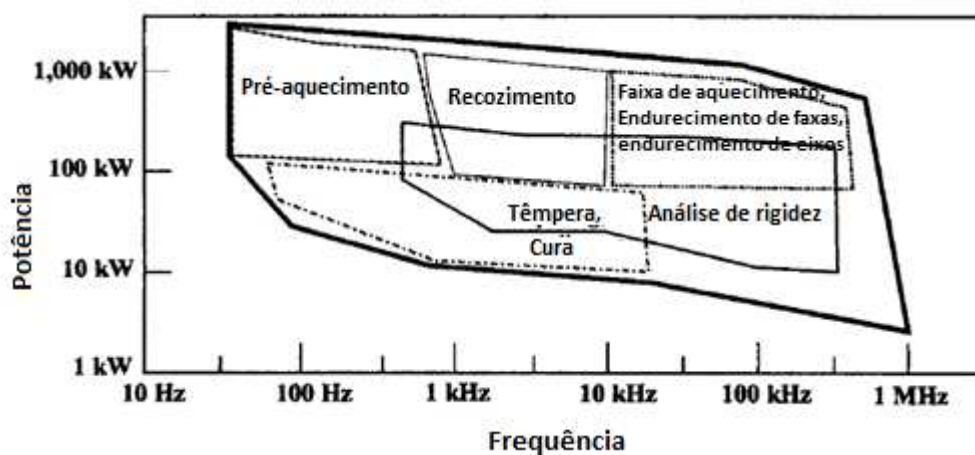


Figura 9 – Relação potência – frequência

Fonte: RUDNEV (2002).

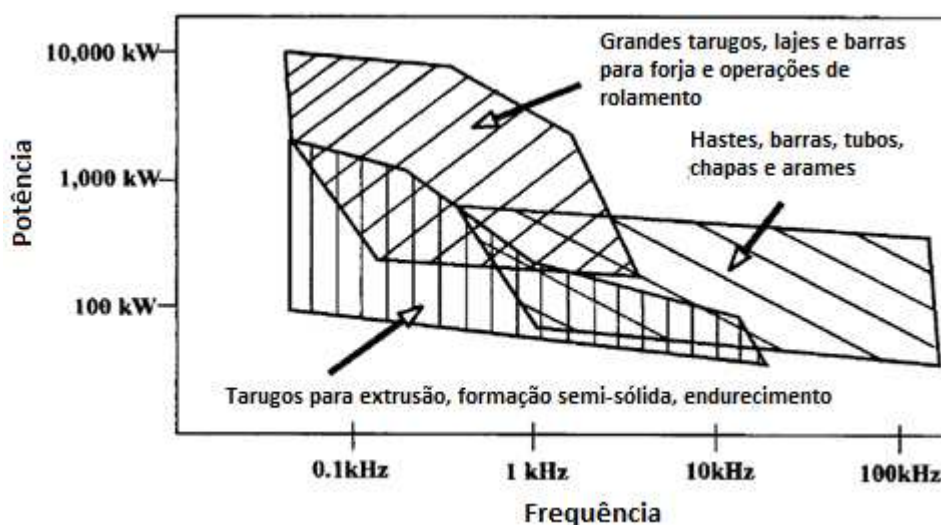


Figura 10 – Relação potência - frequência

Fonte: RUDNEV (2002).

2.6 FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Existem muitos modelos e topologias relativas à alimentação elétrica dos equipamentos de aquecimento indutivo. A potência necessária para uma dada aplicação vai depender do volume e do tipo de metal a ser tratado, da velocidade de aquecimento e da eficiência do processo de aquecimento. Peças pequenas aquecidas a uma pequena profundidade precisarão de apenas um ou dois quilowatts de potência, enquanto grandes peças de aço aquecidas para temperaturas acima de seu ponto Curie podem exigir muitos megawatts de potência (RUDNEV, 2002).

A geometria da peça e da bobina, assim como as propriedades elétricas do material a ser aquecido, determina a tensão e corrente da bobina. A definição destes parâmetros é necessária para assegurar que a saída da fonte de alimentação é capaz de suprir as exigências da bobina. A maioria dos sistemas de alimentação de fornos a indução já possuem a capacidade de operar em uma gama razoável de parâmetros da bobina (RUDNEV, 2002).

A frequência é um parâmetro muito importante no aquecimento a indução, pois é ela que determinará a profundidade de penetração da corrente na peça de trabalho. Desta forma, é importante conhecer a faixa de variação da frequência para a determinação do tipo de alimentação elétrica do equipamento. O circuito elétrico de potência deve garantir que os componentes vão operar de forma adequada dentro do range de potência e frequência ao qual o equipamento se destina.

Um diagrama de blocos básico, que se aplica a quase todas as fontes de alimentação de aquecimento a indução, é mostrada na figura 11. A entrada é geralmente trifásica de 50 ou 60Hz com uma tensão entre 220 e 575V. O primeiro bloco representa o conversor CA/CC ou retificador. Este componente pode fornecer uma tensão contínua fixa, uma tensão contínua variável ou uma corrente contínua variável. O segundo bloco representa o inversor ou oscilador, que converte a corrente contínua para produzir uma saída monofásica de corrente alternada. O terceiro bloco representa os componentes de gerenciamento de carga, que adaptam a saída do inversor de frequência para os parâmetros requeridos pela bobina de indução.

O sistema de controle compara o sinal de saída com os parâmetros necessários para determinada aplicação regulada pelo operador. Assim, o sistema de controle ajusta a saída do retificador ou do inversor de frequência para proporcionar o aquecimento desejado.

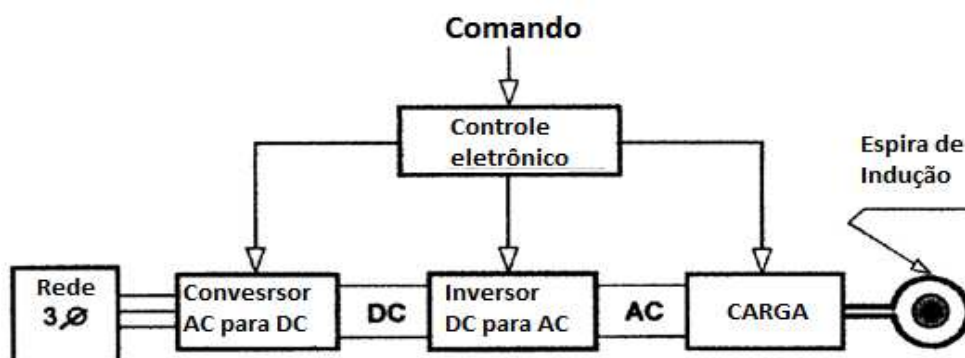


Figura 11 – Relação potência - frequência

Fonte: RUDNEV (2002).

O inversor de frequência pode ser constituído por uma inúmera variedade de topologias e vários tipos de componentes empregados em sua construção. Os componentes mais utilizados no chaveamento dos circuitos inversores de frequência são os tiristores, IGBT e mosfet. A figura 12 contextualiza a faixa de aplicação de cada um deles com relação à potência e frequência do equipamento.

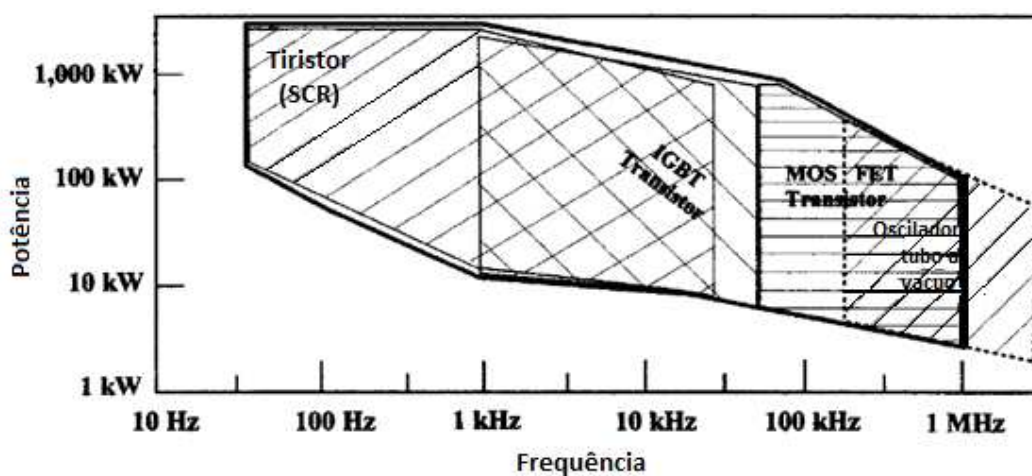


Figura 12 – Aplicação de componentes no inversor de frequência

Fonte: RUDNEV (2002).

2.7 IMPACTOS NA REDE ELÉTRICA

Os parâmetros mais importantes que afetam a qualidade de energia elétrica são os harmônicos, a instabilidade de tensão e baixo fator de potência (ARRILLAGA, 2000).

O problema mais evidente em fornos a indução, do ponto de vista elétrico, é a criação de uma considerável distorção harmônica nas formas de onda de tensão e corrente (ZAMORA, 2005). Estas distorções causam baixa eficiência do sistema, baixo fator de potência e podem causar perturbação para outros consumidores, além de interferências nas redes de comunicação (DE LA ROSA, 2006).

A causa das distorções harmônicas está no projeto e no modo de operação do forno de indução. Um forno de indução trabalha aquecendo metal utilizando um campo magnético de média frequência criado por uma bobina. A bobina é alimentada pela corrente alternada de média frequência fornecida por um inversor, que por sua vez é alimentado por um conversor de corrente contínua ligado à rede de distribuição (ZAMORA, 2005).

Fornos de indução alimentados por inversores de frequência geram harmônicos fixos e variáveis. Tanto os conversores de corrente quanto de tensão geram distorções harmônicas na linha durante o processo de retificação da forma de onda de CA para CC (EPRI, 1999).

As distorções harmônicas que circulam pelas redes de distribuição causam perdas adicionais no sistema e diminuem a vida útil de equipamentos. Além disso, as harmônicas podem interferir com a comunicação, controle e proteção de equipamentos (GEORGE, 2008).

Além das distorções harmônicas que são normalmente esperadas em circuitos retificadores, os fornos que funcionam a algumas centenas de hertz podem gerar também inter-harmônicas (EPRI, 1999). Inter-harmônicas podem causar sobrecarga de bancos de capacitores, ruídos em transformadores, fazer o sistema de iluminação piscar sem motivos aparentes, além de operações indevidas em outros circuitos eletrônicos (EPRI, 1999).

2.8 FORNO EM ESTUDO

2.8.1 Características Gerais

Para a análise da qualidade de energia elétrica de um forno de indução, adotaremos como objeto de estudo um forno de aquecimento indutivo da marca Jamo, ilustrado na figura 13. O equipamento encontra-se instalado em uma forjaria localizada no município de Campo Largo – PR. Este equipamento é utilizado no processo de fabricação de eixos automotivos de grande porte.



Figura 13 – Forno de aquecimento indutivo

Fonte: Foto do autor (2013).

As características elétricas do forno são as seguintes:

- Modelo: JMMF;
- tensão de alimentação: 380V;
- frequência de entrada: 60Hz;
- potência nominal: 150kW;
- número de série: E-04780;
- data de fabricação: 18/11/2010.

Os dados citados podem ser observados na figura 14, que ilustra a placa do equipamento.



Figura 14 – Dados de placa

Fonte: Foto do autor (2013).

2.8.2 Topologia do circuito elétrico do forno

A topologia do forno estudado é constituída por uma entrada trifásica que é retificada através de um retificador trifásico de seis pulsos. A saída desse retificador é conectada a um filtro LC que alimenta um inversor de frequência em ponte

completa, este controla a frequência com a qual será alimentada a bobina de aquecimento. Este circuito está representado na figura 15.

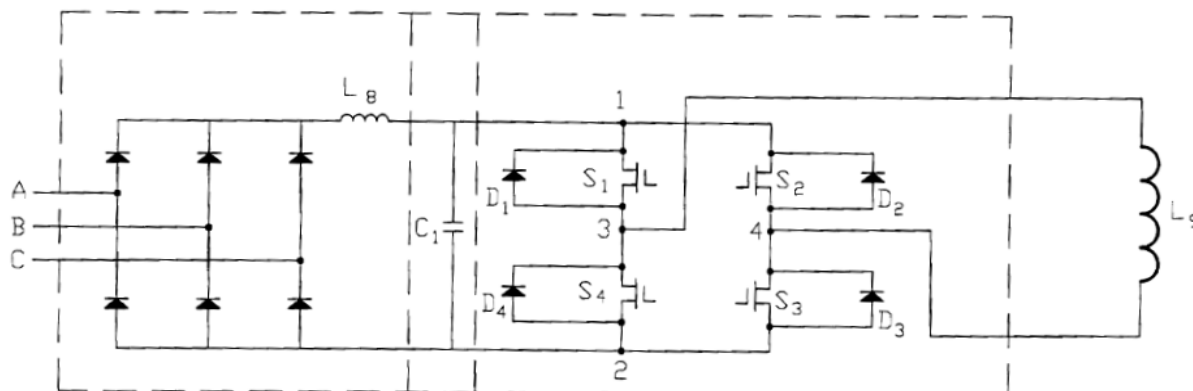


Figura 15 – Dados de placa

Fonte: Nadot (2003).

A ponte retificadora de seis pulsos converte a tensão trifásica alternada em tensão contínua. O indutor L_8 atenua a ondulação da corrente de saída do retificador, enquanto o capacitor C_1 atenua a ondulação de tensão. O capacitor C_1 também deve ser selecionado de forma a se produzir um circuito ressonante entre a impedância da bobina de carga L_9 e a frequência de funcionamento do inversor.

O inversor de frequência é composto por quatro IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) S_1 , S_2 , S_3 e S_4 , associados em antiparalelo com quatro diodos, D_1 , D_2 , D_3 e D_4 . Alternando os ciclos de condução e não-condução dos pares de IGBT S_1/S_3 e S_2/S_4 é produzida a frequência de saída desejada nos terminais da bobina de carga.

O indutor L_9 representa a bobina de carga usada para o aquecimento indutivo. A figura 16 ilustra a bobina de carga do forno utilizado no estudo.

A bobina de carga possui um sistema de refrigeração a água. Este recurso é de fundamental importância ao funcionamento do forno devido à elevada corrente que circula pela bobina.



Figura 16 – Bobina de carga

Fonte: Foto do autor (2013).

A tensão de alimentação da indústria proprietária do forno é 220/127V. Como a tensão de alimentação do forno é trifásica de 380V, existe um autotransformador entre o quadro de alimentação e a entrada do forno. Não existe um transformador de potência destinado a alimentar somente o forno de aquecimento a indução, existem outras cargas da indústria alimentadas pelo mesmo QGBT (Quadro geral de baixa tensão) que alimenta o equipamento em estudo.

3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores nasceu junto com as primeiras experiências comerciais relacionadas com a geração, transmissão e distribuição de energia, no século XIX. Já em 1934 a legislação brasileira estabelecia, em seu Código de Águas, os primeiros indicadores de controle sobre esta qualidade (ALVES, 2010).

Durante muito tempo a preocupação com o assunto estava focada, exclusivamente, no objetivo de minimizar as horas de interrupção sustentada de energia. Já nas décadas de 1970 e 80, questões como distorções harmônicas e cintilação luminosa (flicker), começaram a ser intensamente discutidas pela comunidade do setor elétrico nacional, resultando em alguns procedimentos impostos pelas concessionárias quando do atendimento de novas cargas industriais, sem, contudo, se estabelecer uma legislação específica sobre o assunto (ALVES, 2010).

A QQE (Qualidade de Energia Elétrica) abrange uma grande variedade de termos que transitam por inúmeras áreas do sistema de energia elétrica - geração, transmissão e distribuição - até o consumo. Aborda problemas relacionados com o funcionamento de equipamentos, comunicação, telefonia, dados e etc. Na essência, o termo é usado para caracterizar qualquer variação de amplitude, de frequência e/ou qualquer deformação da forma de onda das grandezas elétricas (em condições de regime transitório ou permanente) num sistema elétrico de energia, que pode causar a falha ou o mau funcionamento dos equipamentos elétricos (MARTINHO, 2009).

Segundo Alves (2010), a qualidade de energia elétrica, do ponto de vista do consumidor, pode ser definida como sendo a ausência de variações manifestadas na tensão, corrente ou frequência que resultem em falhas ou má operação de seus equipamentos. Já para Albadó (2001), o conceito de qualidade de energia elétrica

significa a busca por desenvolvimento de meios para erradicar ou minimizar problemas em dispositivos alimentados por fontes de energia elétrica.

Perturbações provocadas por outros consumidores, ou mesmo pela carga do próprio consumidor, afetam a percepção deste em relação à qualidade da energia elétrica. Alguns tipos de dispositivos ou equipamentos elétricos, incluindo grande parte dos equipamentos que utilizam novas tecnologias como, por exemplo, os conversores estáticos, provocam perturbações na rede (distorções harmônicas, flutuações de tensão e desequilíbrios), que degradam a qualidade da energia fornecida pela concessionária e podem alterar o desempenho ou mesmo danificar outros equipamentos (ALVES, 2010).

A preocupação com a QEE dentro do segmento industrial é normalmente maior do que em outros, uma vez que o índice de automação das indústrias é muito elevado. Em consequência dessa automação, o impacto de problemas com relação à qualidade de energia passa a ser muito maior, pois parada de máquinas e queima de equipamentos causam prejuízos financeiros enormes para empresários e também para o usuário (MARTINHO, 2009).

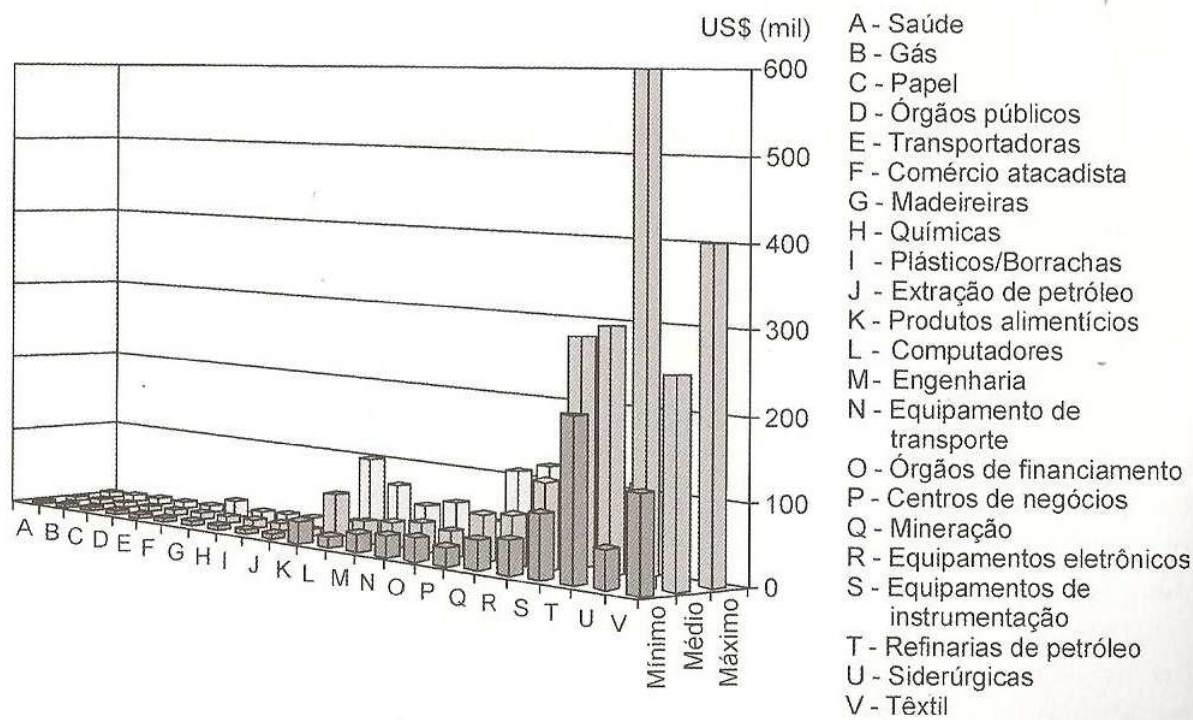


Figura 17 – Custos das perdas financeiras estimado para parada de até um minuto.

Fonte: (MARTINHO, 2009).

A figura 17 mostra como uma simples interrupção de fornecimento de energia elétrica pode ser custosa para diversos segmentos industriais. A partir do momento que as empresas começaram a perceber os elevados custos globais de uma baixa qualidade de energia, o setor industrial vem cada vez mais se preocupando com esses aspectos.

Apesar dessa maior preocupação no segmento industrial, a solução efetiva desses problemas ainda está distante. O mercado, em muitos casos, ainda trabalha com a premissa financeira e com isso, muitas vezes, o investimento feito em automação, desde a contratação de projeto até a instalação, passando pela aquisição de equipamentos, é feito pelo preço e pela atuação do dispositivo no que diz respeito à automação em si e poucas vezes avaliado o efeito colateral que ele pode gerar aos demais circuitos (MARTINHO, 2009).

Apesar dessa prática do mercado ser frequente e acabar refletindo no bolso do empresário, muitas empresas já estão levando em conta que o controle da qualidade de energia é inerente ao bom desempenho da produção, que conseqüentemente reflete em maior retorno financeiro para o empresário e no âmbito nacional contribui para o bom desempenho do segmento industrial.

3.2 DISTÚRBIOS ELÉTRICOS

O distúrbio de energia elétrica produz resultados indesejáveis para o sistema conectado como carga. Também chamado de problema de energia, que é um conjunto de distúrbios, ele aparece no sistema devido a fatores externos e internos. Os fatores externos são os produzidos pelos subsistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição (ALBADÓ, 2001). Os fatores internos são causados principalmente pela qualidade das instalações do consumidor e pela natureza das cargas alimentadas.

Segundo Martinho (2009), um distúrbio elétrico é qualquer variação de amplitude, de frequência e/ou qualquer deformação da forma de onda das grandezas elétricas. Os distúrbios elétricos são eventos que podem ser medidos ou

registrados por instrumentos utilizados para monitorar sistemas elétricos. Esses instrumentos são geralmente analisadores de energia e osciloscópios digitais.

Segundo a norma internacional IEEE 1159 (1995), os distúrbios eletromagnéticos relacionados à qualidade de energia elétrica podem ser classificados como transitórios, variação de tensão de curta duração, variação de tensão de longa duração, desequilíbrio de tensão, distorções de forma de onda, flutuação de tensão e variação de frequência. A ocorrência de distúrbios eletromagnéticos está relacionada a uma série de fatores identificados da operação normal de determinadas cargas ou dispositivos em um sistema elétrico ou da ocorrência de fenômenos naturais. A tabela 1 identifica estes principais fatores.

Tabela 1 – Principais causas dos fenômenos eletromagnéticos

Categoria	Principais Causas
1. Transitório	
1.1. Impulsivo	Descargas atmosféricas
1.2. - Oscilatório	Energização de bancos de capacitores
2. Variação de curta duração	
2.1. Afundamento de tensão (Sag)	Faltas, chaveamento de cargas pesadas, partidas de grandes motores
2.2 Salto de tensão (Swell)	Faltas - Curto circuito fase-terra provocando elevação de tensão na fase sem falta
2.3 Interrupção	Faltas, falhas em equipamentos, disfunção de controle
3. Variação de longa duração	
3.1. Interrupção sustentada	Falhas de natureza permanente e que necessitam de intervenção manual para sua restauração
3.2. Subtensão	Ligação de cargas, desligamento de banco de capacitores
3.3. Sobretensão	Desligamento de cargas, ligação de banco de capacitores
4. Desequilíbrio de tensão	Cargas desbalanceadas, falhas em bancos de capacitores
5. Distorção de forma de onda	
5.1. Componente CC	Distúrbios geomagnéticos, retificação de meia onda
5.2. Harmônico	Características não lineares de cargas e dispositivos
5.3. Inter-harmônico	Conversores estáticos de frequência, ciclo conversores, motores de indução e dispositivos a arco
5.4. Corte (Notching)	Operação normal de dispositivos de eletrônica de potência
5.5. Ruído	Dispositivos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores de estado sólido, fontes chaveadas
6. Flutuação de tensão (Flicker)	Fornos a arco
7. Variação de frequência	Saída de bloco de cargas ou perda de um grande gerador

Fonte: IEEE 1159 (1995).

A tabela 2 apresenta a classificação dos fenômenos eletromagnéticos ligados à qualidade de energia elétrica, segundo a norma IEEE 1159 (1995).

Tabela 2 – Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos de sistemas elétricos

Categoria	Componente espectral típico	Duração típica	Amplitude de tensão típica
1. Transitório			
1.1. Impulsivo			
1.1.1. Nano Segundos	5 ns (subida)	< 50 ns	-----
1.1.2. Micro Segundos	1 µs (subida)	50 ns - 1 ms	-----
1.1.3. Milissegundos	0,1 ms (subida)	> 1 ms	-----
1.2. - Oscilatório			
1.2.1. Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2. Média frequência	5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 pu
1.2.3. Alta frequência	0,5 - 5 MHz	5 µs	0 - 4 pu
2. Variação de curta duração			
2.1. Instantânea			
2.1.1. Afundamento de tensão (Sag)	-----	0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
2.1.2. Salto de tensão (Swell)	-----	0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2. Momentânea			
2.2.1. Interrupção	-----	0,5 ciclo - 3s	< 0,1 pu
2.2.2. Afundamento de tensão (Sag)	-----	30 ciclos - 3s	0,1 - 0,9 pu
2.2.3. Salto de tensão (Swell)	-----	30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4 pu
2.3. Temporária			
2.3.1. Interrupção	-----	3 s - 1 mim	< 0,1 pu
2.3.2. Afundamento de tensão (Sag)	-----	3 s - 1 mim	0,1 - 0,9 pu
2.3.3. Salto de tensão (Swell)	-----	3 s - 1 mim	1,1 - 1,2 pu
3. Variação de longa duração			
3.1. Interrupção sustentada	-----	> 1 mim	0,0 pu
3.2. Subtensão	-----	> 1 mim	0,8 - 0,9 pu
3.3. Sobre-tensão	-----	> 1 mim	1,1 - 1,2 pu
4. Desequilíbrio de tensão			
	-----	Regime	0,5 - 2 %
5. Distorção de forma de onda			
5.1. Componente CC	-----	Regime	0 - 0,1%
5.2. Harmônico	0 - 100° harmônico	Regime	0 - 20%
5.3. Inter-harmônico	0 - 6 kHz	Regime	0 - 2 %
5.4. Corte (Notching)	-----	Regime	-----
5.5. Ruído	Banda de espectro	Regime	0 - 1 %
6. Flutuação de tensão (Flicker)			
	< 25 Hz	Intermitente	0,1 - 7%
7. Variação de frequência			
	-----	< 10 s	-----

Fonte: IEEE 1159 (1995).

3.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

3.3.1 Definição

Para Martinho (2009), o termo “harmônica” é usado para representar a distorção de uma forma de onda senoidal. Já para Pires (2010), os harmônicos são ondas senoidais de frequência múltiplas inteiras de uma frequência de referência, chamada fundamental. Completa dizendo que os harmônicos são uma forma matemática de analisar a distorção de uma forma de onda, seja ela de tensão ou de corrente. Esta análise é feita por meio da decomposição de uma onda, utilizando a série de Fourier.

A decomposição de uma onda de corrente distorcida em componentes harmônicas da corrente fundamental, com amplitudes e defasamentos angulares, é devida ao matemático francês Jean Baptiste J. Fourier, (1768-1830). Ela é conhecida como Série de Fourier e permite representar, no domínio da frequência, uma determinada função periódica definida no domínio do tempo (ALVES, 2010).

Fourier definiu essa deformação da seguinte maneira: toda função periódica e não senoidal pode ser representada pela soma de expressões, série que é composta por uma expressão senoidal em frequência fundamental e por expressões senoidais cuja frequência de cada senóide é múltipla da senóide fundamental e de uma eventual componente contínua, como mostra a figura 18.

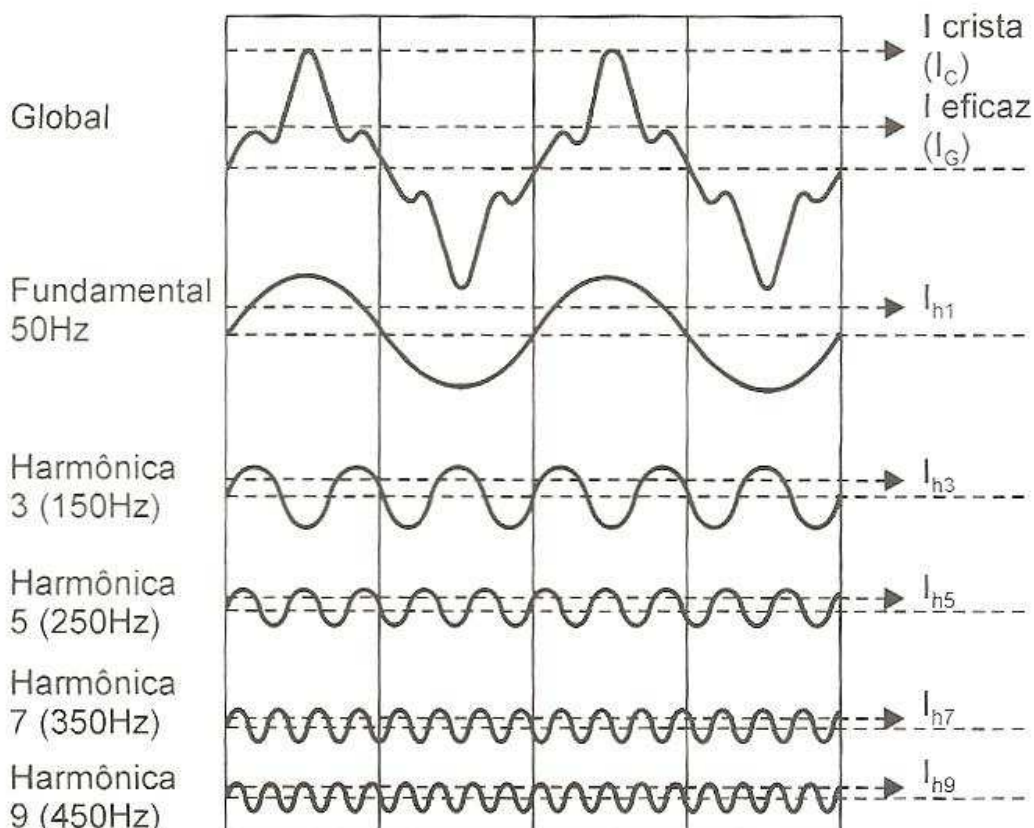


Figura 18 – Representação da decomposição de um sinal distorcido

Fonte: MARTINHO (2009).

Observando essa situação, vê-se que o sinal global é a soma ponto a ponto dos sinais fundamentais e harmônicos formados por senóides perfeitas de amplitudes e frequências diferentes. Dessa forma, podemos dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando a forma de onda desse sinal não é senoidal ou, dito de outro modo, um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal (PROCOBRE, 2010).

3.3.2 Ordem, frequência e sequência das harmônicas

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência, conforme indicado na tabela 3.

Tabela 3 – Ordem, frequência e sequência das harmônicas

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n * 60	-----

Fonte: PROCOBRE (2001).

Quanto à ordem, as harmônicas podem ser pares ou ímpares. As ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral, as pares somente existem nos casos de haver assimetria no sinal devido à presença de componente contínua.

A sequência pode ser positiva, negativa ou nula (zero). Tomando-se como exemplo um motor assíncrono trifásico, alimentado por quatro condutores ($3F + N$), as harmônicas de sequência positiva tenderiam a fazer o motor girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando, assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos, que provocaria um aumento de temperatura, reduzindo a vida útil e permitindo a ocorrência de danos ao motor. Essas harmônicas de sequência positiva provocam, geralmente, aquecimentos indesejados em condutores, motores e transformadores (PROCOBRE, 2010).

As harmônicas de sequência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado. Por sua vez, as harmônicas de sequência nula, zero ou também conhecidas como homopolares, não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém somam-se algebricamente no condutor neutro. Isso implica que podem ocorrer situações em que pelo condutor neutro pode circular uma corrente de terceira ordem que é três vezes maior do que a corrente de terceira

ordem que percorre cada condutor fase. Com isso, ocorrem aquecimentos excessivos do condutor neutro e destruição de bancos de capacitores (PROCOBRE, 2010).

3.3.3 Espectro harmônico

O chamado “espectro harmônico” permite decompor um sinal em suas componentes harmônicas e representá-lo na forma de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência, valor eficaz e defasagem.

O espectro harmônico é uma representação da forma de onda no domínio da frequência. Teoricamente, o espectro harmônico de um sinal deformado qualquer chegaria ao infinito. Na prática, geralmente limita-se o número de harmônicas a serem medidas e analisadas por volta da ordem de número 40, uma vez que, raramente, os sinais acima dessa ordem são significativos a ponto de poderem perturbar o funcionamento de uma instalação (PROCOBRE, 2010).

A figura 19 mostra a forma de onda distorcida gerada por uma fonte chaveada, e a figura 20 representa o seu respectivo espectro harmônico.

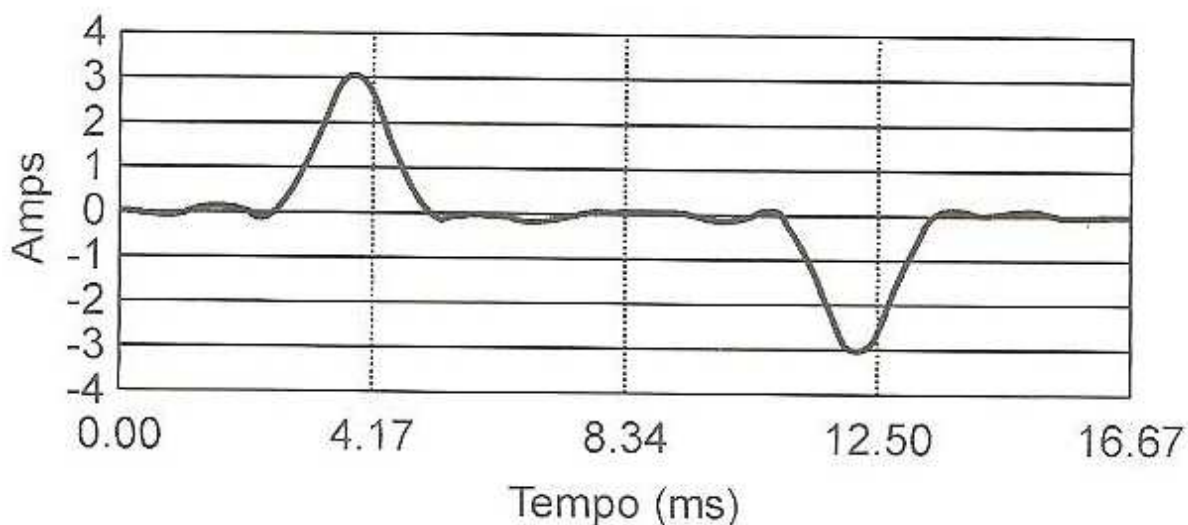


Figura 19 – Forma de onda de corrente gerada por uma fonte chaveada

Fonte: MARTINHO (2009).

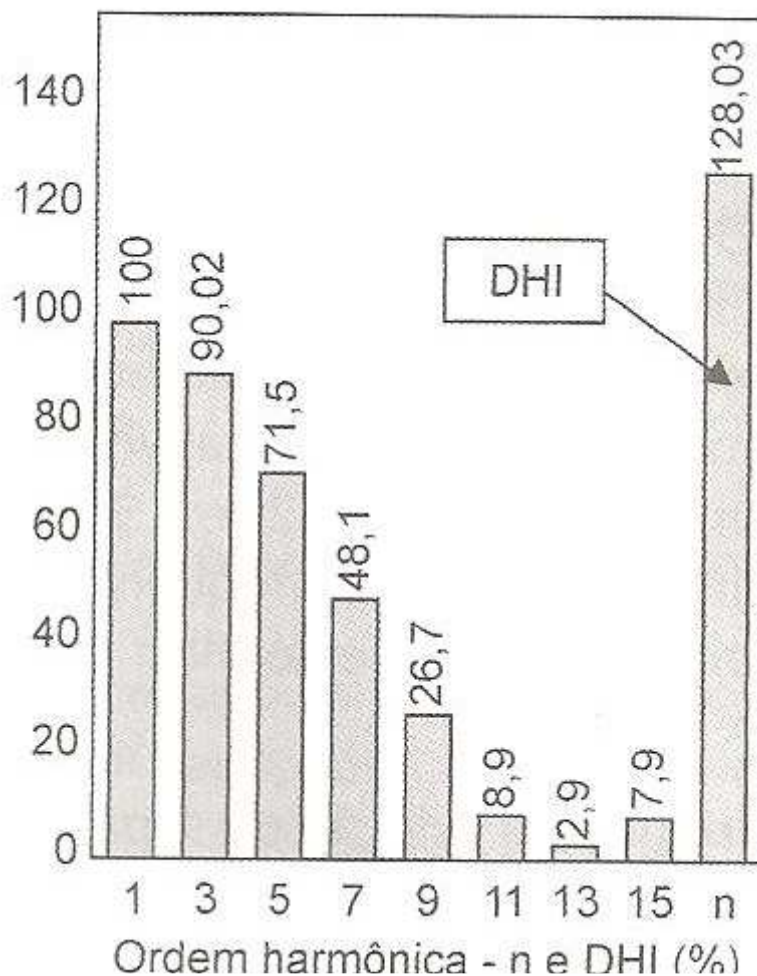


Figura 20 – Espectro harmônico de corrente gerado em fonte chaveada
 Fonte: MARTINHO (2009).

3.3.4 Taxa de distorção harmônica total (DHT)

A taxa de distorção harmônica total (DHT), ou em inglês *total harmonic distortion* (THD), é definida em consequência da necessidade de se determinar numericamente as harmônicas presentes em um dado ponto da instalação. Este índice é utilizado para contabilizar a quantidade de harmônicos presentes em uma onda, ou, em outras palavras, quão distorcida uma onda está em relação a uma onda senoidal. Quando se consideram os valores de corrente, se obtêm a distorção harmônica total de corrente (DHTi), quando se consideram os valores de tensão, se obtêm a distorção harmônica total de tensão (DHTv). A equação 1 apresenta a forma genérica de se calcular o DHT.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^k f_n^2}}{f_1} \times 100\% \quad (1)$$

Onde f_1 é o módulo da grandeza na frequência fundamental, n é a ordem harmônica, k é o último harmônico considerado e f_n é o módulo da grandeza na frequência harmônica. De forma prática, a equação 2 formula o cálculo da DHT até a ordem 11.

$$THD = \frac{\sqrt{(f_2)^2 + (f_3)^2 + (f_4)^2 + (f_5)^2 + (f_6)^2 + (f_7)^2 + (f_8)^2 + (f_9)^2 + (f_{10})^2 + (f_{11})^2}}{f_1} \quad (2)$$

A distorção de corrente, indicada pela THDI, é provocada pela carga, ao passo que a distorção de tensão (THDU) é produzida pela fonte geradora como consequência da circulação de correntes distorcidas pela instalação. Isso provoca uma espécie de “efeito bola de neve” uma vez que, se a tensão é deformada, as correntes nas cargas também se deformam e se as correntes se deformam as tensões se deformam mais ainda e assim por diante (PROCOBRE, 2010).

3.3.5 Cargas lineares e não lineares

De acordo com Alves (2010), podem-se classificar as cargas em três classes em relação à geração de harmônicas:

- cargas não perturbadoras, que em operação não perturbam significativamente a forma de onda das tensões da rede ou das tensões aplicadas a outros equipamentos. São as cargas lineares (CL), que segundo PROCOBRE (2010), são constituídas por resistências, indutâncias e

capacitâncias, onde as formas de onda de tensão e corrente são sempre senoidais, a relação entre tensão e corrente é sempre constante;

- cargas perturbadoras, que causam problemas nas redes elétricas e em outros equipamentos, distorcendo as formas de onda. São as cargas não lineares (CNL), cuja relação entre tensão e corrente não é constante. Para as CNLs é impossível fazer uma previsão imediata sobre a relação entre corrente e tensão. Os elementos de eletrônica de potência como retificadores, pontes chaveadas e inversores de frequência são considerados CNLs;
- cargas sensíveis, vítimas dos problemas da QEE e cujas características de funcionamento se modificam substancialmente com as distorções harmônicas. Muitas vezes, são perturbadas por distorções causadas por elas mesmas.

Em um sistema de potência ideal, limpo de harmônicas, as formas de onda da corrente e da tensão são senoidais puras. Na prática, se produzem correntes não senoidais quando a corrente que circula pela carga não tem uma relação linear com a tensão aplicada. Em um circuito simples que possua apenas cargas lineares resistivas, indutivas e capacitivas, a corrente que circula é proporcional à tensão aplicada para uma frequência determinada. Se uma tensão senoidal é aplicada a este sistema, se produz uma corrente senoidal, como ilustrado na Figura 21. A curva de carga é a relação entre a tensão aplicada e a corrente que circula pela carga, tal como mostrado na Figura 21 (correspondente a uma carga linear). Note-se que se está presente um elemento reativo, haverá uma defasagem entre as formas de onda da tensão e da corrente, e o fator de potência se reduz, mas o circuito continua sendo linear (CHAPMAM 2002).

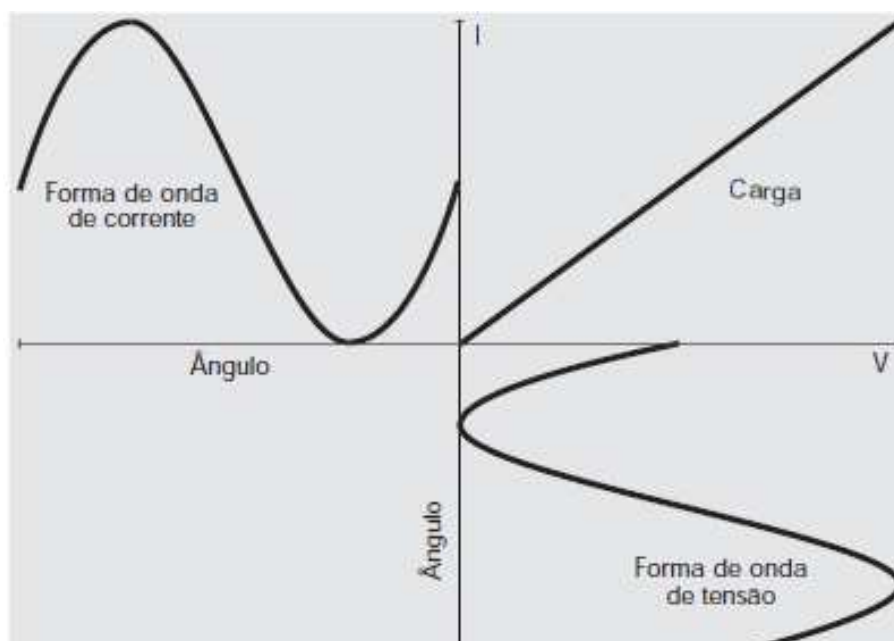


Figura 21 – Forma de onda em uma carga linear

Fonte: CHAPMAM (2002).

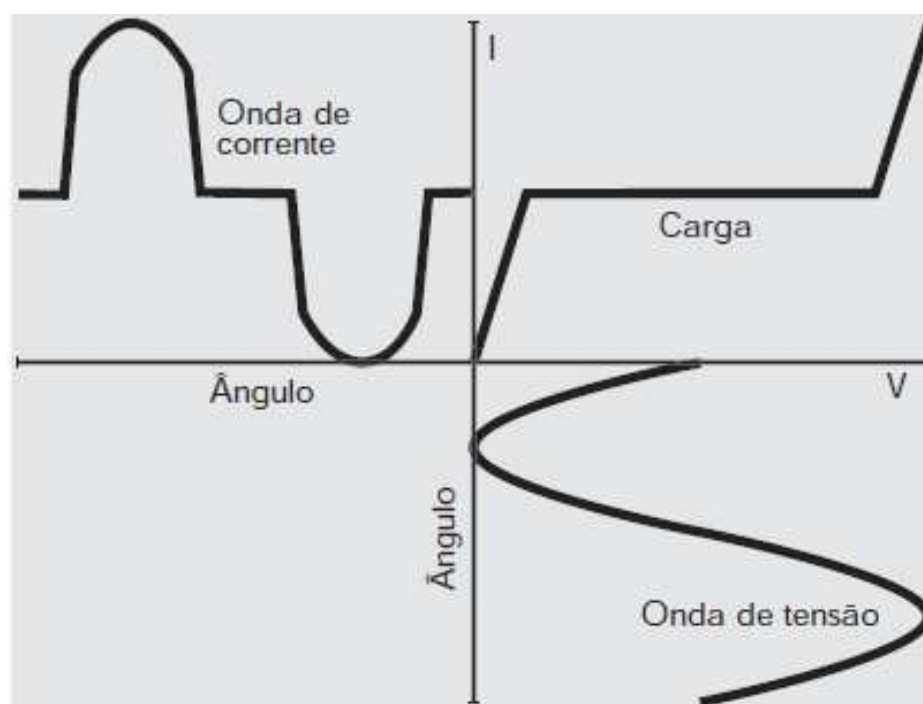


Figura 22 – Forma de onda em uma carga não linear

Fonte: CHAPMAM (2002).

A Figura 22 mostra a situação em que a carga não é linear, sendo constituída por elementos de eletrônica de potência, como por exemplo, um retificador.

Todas as ondas cíclicas podem ser decompostas em uma onda senoidal na frequência fundamental mais uma série de senóides para as frequências harmônicas. Portanto, a forma de onda distorcida representada na Figura 11, pode ser decomposta em uma onda fundamental, mais uma porcentagem da segunda harmônica, mais uma porcentagem da terceira harmônica, e assim sucessivamente. Para as ondas simétricas, isto é, aquelas em que os ciclos positivo e negativo têm a mesma forma e amplitude, todas as harmônicas pares são iguais a zero. Os harmônicos pares são, atualmente, relativamente raros, mas eram muito comuns quando se utilizavam os antigos retificadores de meia onda (CHAPMAM, 2002).

3.3.6 Consequências das distorções harmônicas

Segundo Procobra (2010), qualquer sinal de corrente ou de tensão, cuja forma de onda não seja senoidal, pode provocar danos na instalação elétrica em que está presente e/ou em seus componentes e aparelhos a ela conectados.

Há vários efeitos provocados pelas harmônicas, sendo que alguns podem ser notados visualmente, outros podem ser ouvidos, outros são registrados por medidores de temperatura e ainda há os casos em que se necessitam utilizar equipamentos especiais para detectá-los.

Os principais efeitos observados em instalações e componentes submetidos à presença de harmônicas são: aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, vibrações e acoplamentos, aumento da queda de tensão, redução do fator de potência da instalação e tensão elevada entre neutro e terra.

Em consequência dos efeitos mencionados, pode haver problemas associados ao funcionamento e desempenho de motores, fios e cabos, capacitores, computadores e transformadores.

3.3.6.1 Aquecimentos Excessivos

A corrente alternada tende a circular pela superfície externa dos condutores. Este fenômeno é conhecido como efeito pelicular ou efeito *skin*, é mais pronunciado nas altas frequências. Este efeito é habitualmente ignorado porque tem pequena influência na frequência fundamental. Entretanto, para frequências acima de 350Hz, isto é, para as harmônicas de ordem 7 e superiores, o efeito pelicular pode alcançar valores importantes, produzindo perdas e aquecimentos adicionais (CHAPMAM, 2002).

3.3.6.2 Sobreaquecimentos e tensão elevada entre neutro e terra

A circulação de correntes harmônicas pelo condutor neutro provoca uma queda de tensão entre esse condutor e a terra, uma vez que a impedância do cabo não é zero. Em alguns equipamentos eletrônicos, a presença de certa tensão entre neutro e terra pode prejudicar a correta operação do mesmo (PROCOBRE, 2010).

As harmônicas que são múltiplas ímpares do triplo da fundamental, as denominadas harmônicas “triple n”, somam-se no condutor neutro. Um sistema trifásico com cargas equilibradas não deveria ter correntes circulando pelo condutor de neutro, porém com a presença de harmônicas essa corrente pode se tornar significativa. Caso o condutor do neutro não esteja corretamente dimensionado para suportar essa corrente, o condutor pode sobreaquecer acima da sua capacidade causando perigo a instalação elétrica (CHAPMAM, 2002).

Em alguns casos, quando se analisa a corrente de alimentação de equipamentos de aquecimento a indução e outros aparelhos trifásicos sem condutor de neutro, pode-se observar a componente de terceira harmônica e suas múltiplas circulando pelos condutores, porém esta componente não é de sequência zero, uma vez que não existe o condutor de neutro no circuito alimentador.

3.3.6.3 Efeitos sobre os transformadores

Segundo Chapam (2002), os transformadores são afetados pelas harmônicas de duas maneiras. Em primeiro lugar, as perdas por correntes de Foucault, que normalmente representam aproximadamente 10% das perdas a plena carga, aumentam em função do quadrado da ordem das harmônicas. O resultado é uma temperatura muito mais elevada e, como consequência, uma redução da vida útil do equipamento.

O segundo efeito está relacionado com as harmônicas de ordem 3. Elas estão em fase no enrolamento de um transformador conectado em triângulo. Assim, estas correntes harmônicas serão absorvidas pelo enrolamento e não serão distribuídas para a linha de alimentação, de forma que os transformadores com enrolamento em triângulo são úteis como transformadores de isolamento. Para evitar aquecimentos excessivos as correntes destas harmônicas que circulam pelo transformador deverão ser consideradas no dimensionamento do mesmo.

3.3.6.4 Efeitos sobre bancos de capacitores

Um capacitor em paralelo com uma indutância forma um circuito ressonante, capaz de amplificar os sinais de uma dada frequência. Quando em uma instalação elétrica instala-se um banco de capacitores, um circuito ressonante é formado, uma vez que os capacitores e a instalação elétrica, que é de natureza indutiva, são colocados em paralelo (PROCOBRE, 2010). Assim, certas harmônicas podem ser amplificadas, gerando tensões e correntes muito elevadas, que frequentemente provocam avarias catastróficas no banco de capacitores, levando-os à queima ou explosões.

3.3.6.5 Disparos de dispositivos de proteção

Os sinais harmônicos podem apresentar correntes com valores eficazes pequenos, porém com elevados valores de pico (alto fator de crista), o que pode fazer com que alguns dispositivos de proteção termomagnéticos e diferenciais disparem. Isso

ocorre porque as correntes harmônicas provocam um aquecimento ou um campo magnético acima daquele que haveria sem a sua presença. (PROCOBRE, 2010). Em dispositivos DR (diferencial-residual) pode ocorrer que as componentes de alta frequência não se somem corretamente, provocando erroneamente um desligamento.

Em locais com grande concentração de computadores pessoais, fotocopiadoras, impressoras e outros aparelhos eletroeletrônicos é comum haver disparos imprevistos das proteções, o que pode significar, em muitos casos, a perda de grandes quantidades de trabalhos e danos a equipamentos.

3.3.6.6 Vibrações e acoplamentos

As altas frequências das harmônicas podem provocar interferências eletromagnéticas irradiadas ou conduzidas que, por sua vez, provocam vibrações em quadros elétricos, em transformadores e/ou acoplamentos em redes de comunicações, prejudicando a qualidade da conversação ou da troca de dados e sinais em geral (PROCOBRE, 2010).

3.3.6.7 Motores de indução

As tensões harmônicas provocam um aumento das perdas por correntes de Foucault nos motores. Além disso, aparecem perdas adicionais devido a campos magnéticos harmônicos gerados no estator, cada um dos quais tenta fazer girar o motor a uma velocidade diferente ou mesmo inverter o sentido de rotação, conforme se trate de harmônicas de sequência positiva ou negativa. As correntes de alta frequência induzidas no rotor aumentam ainda mais as perdas. Na presença de distorção harmônica de tensão, os motores devem ser redimensionados levando em conta essas perdas adicionais (CHAPMAM, 2002).

3.3.7 Soluções para o problema dos harmônicos

As soluções efetivas para os problemas das distorções harmônicas são na maioria das vezes muito caras. O uso de filtros (ativos e passivos) e de transformadores de separação podem reduzir consideravelmente as distorções harmônicas, porém possuem um elevado custo. Muitas vezes a solução mais viável é conviver com as harmônicas, adotando algumas técnicas para reduzir os seus efeitos no restante da instalação.

3.3.7.1 Filtros passivos

Os filtros passivos são usados para estabelecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, de forma que circulem pelo filtro e não pela fonte de alimentação. O filtro pode ser projetado para uma única harmônica ou para uma faixa ampla de harmônicas, dependendo das exigências do sistema (CHAPMAM, 2002). Para a instalação de um filtro passivo é necessário um estudo para saber qual a intensidade das harmônicas presentes no sistema, para desenvolver um filtro específico para os parâmetros encontrados. Caso a carga geradora de harmônicos sofra alterações de parâmetros durante o seu funcionamento normal, esse tipo de filtro não pode ser aplicado, pois ele é desenvolvido somente para um determinado nível de determinadas harmônicas, não sendo variável.

Além de serem simples e confiáveis, possuem um desempenho satisfatório na frequência sintonizada e aumentam o fator de potência da instalação. Em contra partida, possuem um limite de espectro de atuação, ou seja, os filtros eliminam apenas o sinal harmônico sintonizado e atenuam outras harmônicas próximas, mas não são eficazes para uma banda mais larga de sinais. Funcionam adequadamente apenas se não houver alteração nas cargas durante a vida da instalação, uma vez que, a mudança das cargas pode provocar alteração no espectro harmônico da instalação, fazendo com que a frequência de sintonia, previamente estabelecida para um filtro específico, seja diferente do novo valor existente (PROCOBRE, 2010).

3.3.7.2 Filtros ativos

Em algumas instalações, o conteúdo de harmônicas é difícil de prever, sendo necessário um filtro que se ajuste as condições da carga no exato momento. Neste caso é necessária a instalação de um filtro ativo de harmônicos.

O filtro ativo é um dispositivo conectado em derivação. Um transformador de corrente mede o conteúdo de harmônicas da corrente de carga e controla um gerador de corrente que produz uma réplica exata das harmônicas de sinal oposto, que é enviada à fonte de alimentação no ciclo seguinte. Como a corrente harmônica é compensada pelo filtro ativo, apenas a corrente fundamental chega da fonte de alimentação. Na prática, a magnitude das correntes harmônicas é reduzida em até 90%, e como a impedância da fonte é baixa nas frequências harmônicas, a distorção de tensão também é reduzida (CHAPMAM, 2002).

Os filtros ativos são relativamente simples de instalar e podem ser conectados em qualquer ponto da instalação, visando a compensação das harmônicas geradas por uma ou várias cargas não lineares. São versáteis, no que diz respeito às alterações nos padrões de funcionamento das cargas geradoras de harmônicos, uma vez que se ajustam em tempo real as necessidades de correção de harmônicos da instalação. Apesar de suas vantagens os filtros ativos de harmônicos ainda são demasiadamente caros (PROCOBRE, 2010).

3.3.7.3 Transformador de separação para 3ª harmônica e suas múltiplas

A utilização de transformadores com a ligação triângulo/estrela (figura 23) provocará o confinamento da terceira harmônica e suas múltiplas inteiras. Essa solução é muito vantajosa, uma vez que a terceira harmônica e suas múltiplas não irão poluir a instalação a montante do ponto onde foi instalado o transformador (PROCOBRE, 2010).

Com isso, os diversos componentes da instalação situados antes do transformador podem ser dimensionados sem nenhuma preocupação adicional em relação às harmônicas, sobretudo o condutor neutro (PROCOBRE, 2010).

O emprego de transformadores triângulo/estrela é particularmente recomendado para a alimentação de quadros que atendam, principalmente, a equipamentos que possuam fontes monofásicas, tais como computadores pessoais, máquinas de fax, copiadoras e eletrodomésticos em geral (PROCOBRE, 2010).

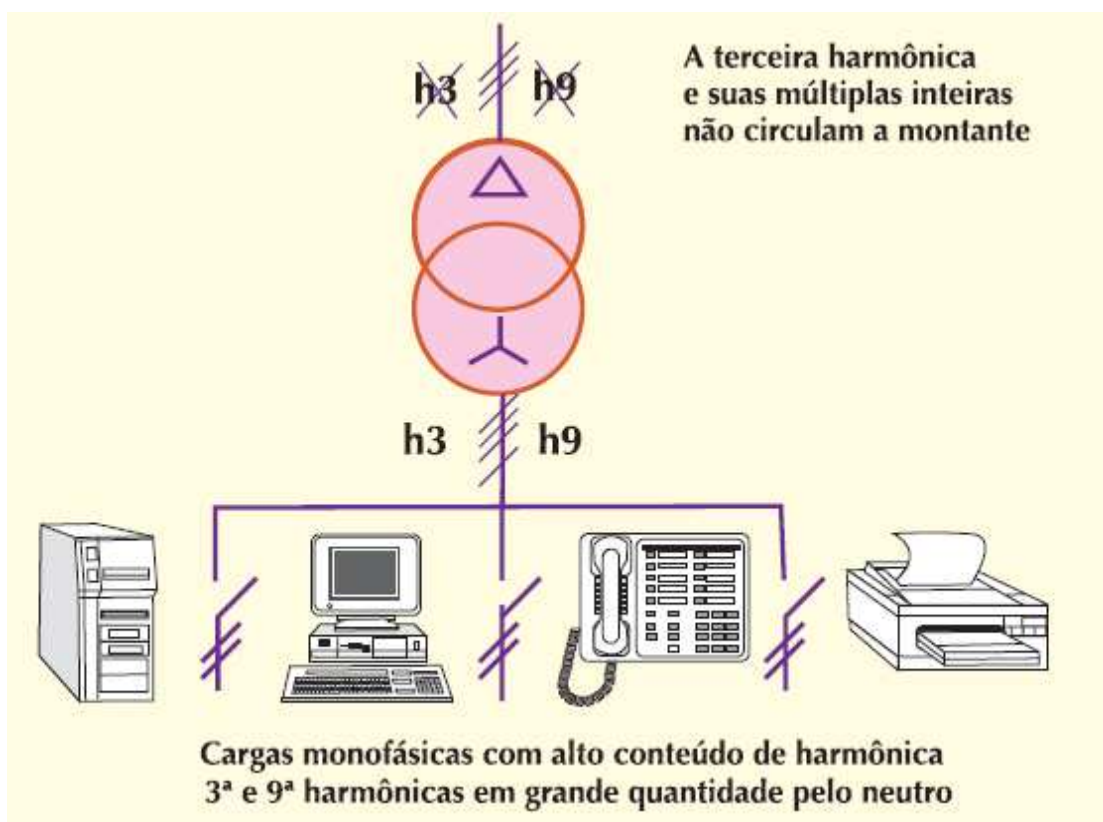


Figura 23 – Transformador para confinamento de 3ª harmônica e suas múltiplas
Fonte: PROCOBRE (2010).

3.3.7.4 Transformador de separação para 5ª e 7ª harmônica e suas múltiplas

Se as cargas geradoras de harmônicas são trifásicas, predominam principalmente as harmônicas de ordem 5 e 7. Nesses casos, uma técnica recomendada para segregação dessas harmônicas consiste na utilização de um transformador com duplo secundário, onde se realiza um defasamento angular de 30° entre os enrolamentos. Outra solução consiste no emprego de dois transformadores com diferentes ligações de forma a também se obter um defasamento de 30° entre as tensões (figura 24). Com essa defasagem entre os secundários, as correntes harmônicas dos dois conjuntos de cargas estão defasadas e a montante (primário) se somam. Como resultado, obtém-se uma redução da taxa de distorção da corrente (THDI) e, em particular, das harmônicas de ordem 5 e 7. Isso porque, com essa defasagem angular, as harmônicas de ordem 5 e 7 de um dos enrolamentos estão em oposição de fase em relação às mesmas ordens de harmônicas do outro enrolamento (PROCOBRE, 2010).

Para que esta aplicação possa oferecer resultados satisfatórios, os transformadores devem alimentar apenas cargas trifásicas em ambos os secundários. Além disso, as cargas poluidoras devem apresentar características similares (mesmo espectro harmônico) nas duas distribuições e os carregamentos dos dois transformadores (ou enrolamentos secundários) precisam ser praticamente iguais, para que a soma das correntes no primário seja muito próxima de zero (PROCOBRE, 2010).

O emprego desse arranjo é particularmente recomendado para a alimentação de quadros que atendam, principalmente, a equipamentos do tipo retificadores trifásicos e variadores de velocidade (PROCOBRE, 2010).

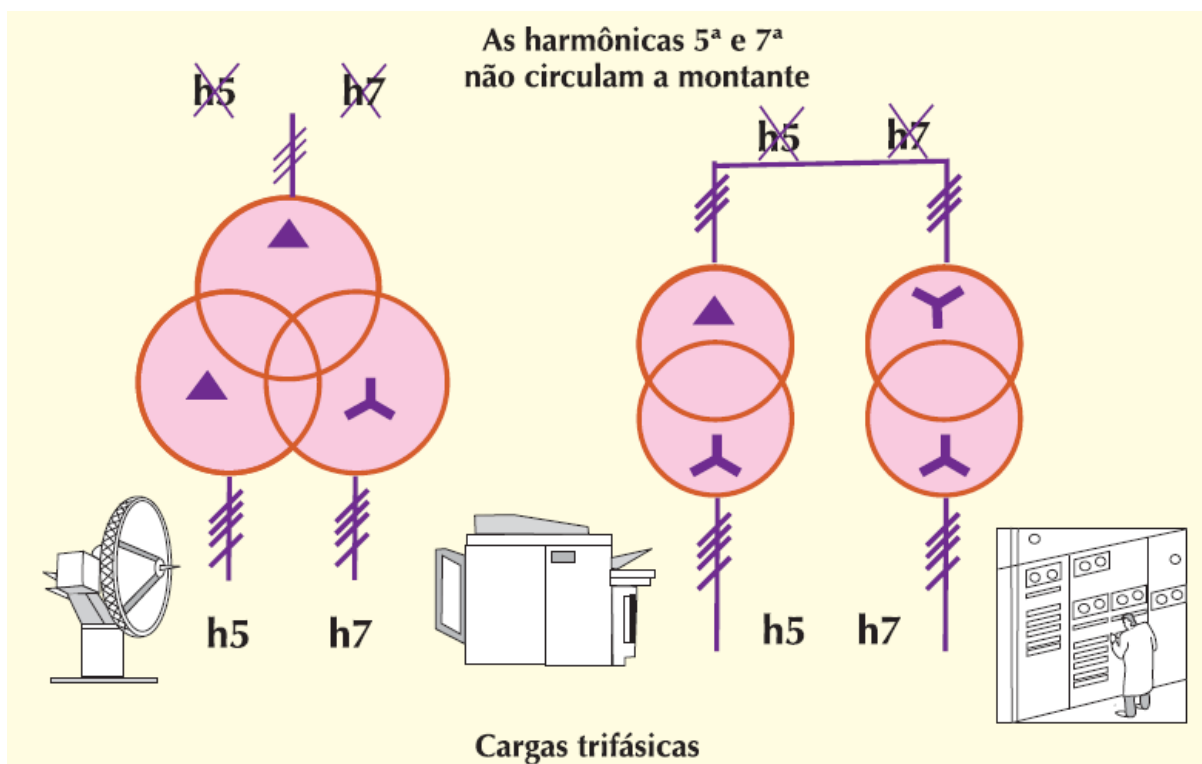


Figura 24 – Transformador para confinamento de 5ª e 7ª harmônica e suas múltiplas
Fonte: PROCOBRE (2010).

3.3.7.5 Soluções para se conviver com as harmônicas

A instalação de filtros passivos e ativos e de transformadores de separação, apesar de ser eficiente em muitos casos, é muito cara. Muitas vezes a solução mais viável é conviver com as harmônicas, adotando algumas técnicas para reduzir os seus efeitos no restante da instalação.

A solução de separar os circuitos ou cargas geradoras de harmônicas dos circuitos ou cargas sensíveis pode ser viável e eficiente, desde que as cargas poluidoras afetem apenas o seu circuito e que a separação destas cargas não gerem um investimento maior do que outras soluções. A separação dos circuitos e cargas poluidoras não elimina a circulação de correntes harmônicas pelo circuito

poluído, apenas isola-o dos circuitos com cargas mais sensíveis às distorções harmônicas.

Redimensionar os condutores de fase e neutro, a fim de que eles suportem as correntes considerando-se os harmônicos pode ser uma medida simples e barata para se combater efeitos de superaquecimento dos condutores e aumento das quedas de tensão.

3.4 INTER-HARMÔNICA

Martinho (2009) define que o distúrbio inter-harmônico é caracterizado pela presença de formas de ondas ou corrente com valores que não são múltiplos da frequência fundamental. As frequências podem aparecer de forma discreta ou com uma larga faixa espectral, em diferentes classes de tensão.

Hanzelka (2004) completa definindo inter-harmônica como distorção em qualquer frequência que é um múltiplo não inteiro da frequência fundamental. Por analogia com a ordem de uma harmônica, a ordem de uma inter-harmônica é determinada pela relação entre a frequência da inter-harmônica e a frequência fundamental. Se este valor é menor do que a unidade, a frequência também é chamada de sub-harmônica.

As correntes inter-harmônicas causam distorções inter-harmônicas de tensão, que dependem das intensidades das componentes de corrente e da impedância do sistema de alimentação naquela frequência. Quanto maior a faixa de frequência das componentes de corrente, maior é o risco da ocorrência de fenômeno de ressonância não desejado, o qual pode aumentar a distorção de tensão e causar sobrecargas ou perturbações na operação dos equipamentos dos clientes e das instalações. Dentre os efeitos diretos mais comuns das inter-harmônicas podem-se citar os efeitos térmicos, oscilações de baixas frequências em sistemas mecânicos, perturbações na operação de lâmpadas fluorescentes e equipamentos eletrônicos, interferência com sinais de controle e proteção em linhas de alimentação de potência, sobrecarga de filtros passivos paralelos para harmônicas de ordens mais

elevadas, interferências em telecomunicação, perturbação acústica e saturação de transformadores de corrente (HANZELKA, 2004).

3.5 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

A flutuação de tensão é definida pelo módulo 8 do PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) – como uma variação aleatória do valor eficaz da tensão, repetitiva ou esporádica.

Segundo Starosta (2012), a flutuação de tensão também é conhecida na terminologia internacional como efeito *flicker* (do inglês, tremer) e pode ser definida como variação do valor eficaz da tensão. Martinho (2009) quantifica o efeito *flicker* como sendo uma variação brusca e intermitente do valor eficaz de tensão de uma faixa entre 0,1 e 7%.

A flutuação de tensão está diretamente relacionada à cintilação luminosa, causada em sistemas de iluminação incandescente por variações de tensão (STAROSTA, 2012). O efeito *flicker* pode ser notado pela sensação visual de que a luminosidade varia no tempo. Esse efeito é também conhecido como cintilação luminosa. Em lâmpadas fluorescentes, o fósforo que reveste a parede interna do bulbo leva um pequeno tempo para perder luminosidade. Reatores eletromagnéticos, que operam em frequência de rede (60Hz), regeneram o arco elétrico da lâmpada entre 100 e 120 vezes por segundo, o que é tempo suficiente para o olho humano perceber a variação de luminosidade do fósforo. Reatores eletrônicos, que operam em alta frequência (20kHz a 50kHz), regeneram o arco elétrico mais de 40.000 vezes por segundo, tempo curto demais para que a variação seja percebida pelo olho (MARTINHO, 2009).

Apesar de se tratar aparentemente de um mero problema de desconforto visual, já ficou demonstrado que esse efeito pode atingir o sistema nervoso central e provocar disfunções neurológicas em observadores submetidos ao processo. Para o observador comum, as variações luminosas podem causar dificuldades para leitura, incômodo visual, dor de cabeça, cansaço visual, estresse mental e perda de

concentração. Isso significa que as pessoas podem ser mais ou menos afetadas por esses efeitos, mas de qualquer modo a sua capacidade produtiva física ou intelectual fica prejudicada (DECKMANN, 2010).

Apesar de se prever para muito em breve o fim da utilização destes sistemas de iluminação incandescente, a flutuação de tensão continuará a ser estudada em função dos problemas causados em outras cargas em sistemas de automação, controle, tecnologia da informação e até mesmo em sistemas de iluminação fluorescentes e de vapor, que também apresentam problemas de operação devido à flutuação de tensão (STAROSTA, 2012).

Este fenômeno é causado principalmente por grandes cargas que consomem grandes volumes de energia reativa que, não suportadas adequadamente pela potência de curto-circuito das redes, acabam por causar seguidos afundamentos na tensão de alimentação (STAROSTA, 2012). Em uma carga variando ciclicamente, a variação da corrente pode provocar uma variação cíclica da tensão e conseqüentemente provocando o efeito de cintilação nas lâmpadas alimentadas pela mesma rede. As cargas mais comuns que geram o efeito *flicker* são os compressores de ar, chuveiro e fornos elétricos com controle automático de temperatura, aparelhos de solda elétrica, prensas e estamparias, elevadores, bombas, fornos a arco, fornos a indução e laminadores siderúrgicos (DECKMANN, 2010).

A atenuação do efeito *flicker* exige capacidade de controlar dinamicamente o nível de tensão na presença das cargas variáveis responsáveis pelo fenômeno. Para isso, utilizam-se normalmente compensadores reativos com capacidade de resposta em até meio ciclo de 60Hz, uma vez que o espectro de *flicker* vai até 30 Hz.

4 NORMATIZAÇÃO

4.1 DISTÚRBIOS DE TENSÃO

4.1.1 PRODIST - Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica

A agência nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no seu documento “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional” (PRODIST), em seu módulo 8, trata dos procedimentos relativos a qualidade de energia elétrica, abordando vários parâmetros elétricos.

No que diz respeito às variações de tensão de curta duração, o módulo 8 apenas as classifica de acordo com os tempos de interrupção e níveis de tensão, porém no item 7.6.1 deixa claro que não são atribuídos padrões de desempenho a estes fenômenos.

Quanto às variações de tensão em regime, o módulo 8 indica, para valores nominais iguais ou inferiores a 1 kV, as faixas de tensão consideradas como sendo valores adequados, precários ou críticos dos níveis de tensão. Conforme tabela no Anexo A.

4.1.2 EN 50160 – Power Quality Standard

A norma europeia EN 50160 define parâmetros de qualidade de energia em baixa e média tensões (baixa até 1kV e média de 1kV a 35kV) nos sistemas de distribuição de energia elétrica e os desvios permitidos.

A tabela no Anexo B mostra os parâmetros estipulados pela norma EN 50160 referentes aos distúrbios de tensão de curta e longa duração para tensões de fornecimento até 1kV.

A norma define os fatores de severidade de oscilação em curto prazo (Pst) e a longo prazo (Plt). O fator de severidade de oscilação em curto prazo (Pst) é a média dos valores de tensão medidos em 10 minutos. O fator de severidade de oscilação em longo prazo (Plt) é calculado a partir de uma sequência de 12 valores de Pst, medidos em um intervalo de duas horas, segundo a fórmula 1.

$$Plt = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} Pst_i^2}{12}} \quad (1)$$

4.1.3 IEC Série 61000 – Compatibilidade Eletromagnética

Trata-se de uma norma editada pela Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC). A tabela no Anexo C representa os parâmetros estipulados pela IEC relativos aos distúrbios de tensão de curta e longa duração para baixas tensões.

De modo análogo a EN 50160, define os fatores de severidade de oscilação em curto prazo (Pst) e a longo prazo (Plt), calculados pela mesma fórmula e parâmetros da referida norma europeia.

4.1.4 NBR 5410 de 2004

A norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão (NBR 5410) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) faz menção às quedas máximas de tensão em qualquer ponto das instalações elétricas.

No item 6.2.7 a NBR 5410 recomenda que em qualquer ponto da instalação a queda de tensão verificada não deve ser superior as seguintes valores, em relação à tensão nominal de fornecimento:

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade da unidade consumidora;

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for ali localizado;
- 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio,
- Em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4%.

A figura 25 exemplifica esses limites.

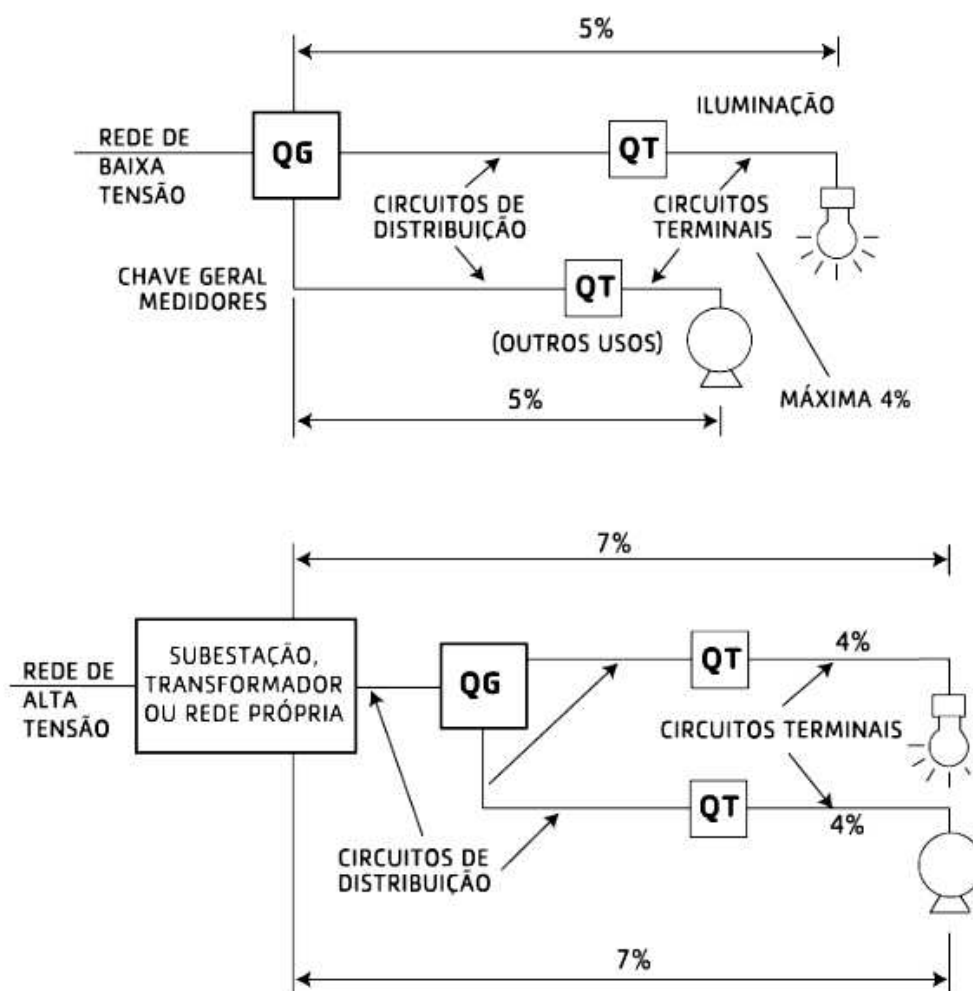


Figura 25 – Limites de queda de tensão

Fonte: PRYSMIAN (2004).

4.2 DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

4.2.1 PRODIST - Módulo 8 – Qualidade De Energia Elétrica

O Módulo 8 do PRODIST trata dos procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica, abordando vários parâmetros elétricos.

No que diz respeito ao desequilíbrio de tensão, o módulo 8 recomenda que o valor máximo do desequilíbrio seja igual ou inferior a 2%. Porém, essa recomendação somente se aplica aos barramentos de AT, não havendo nenhuma recomendação para as instalações de baixa tensão.

4.2.2 EN 50160 – Power Quality Standard

A norma europeia EN 50160 define parâmetros de qualidade de energia em baixas e médias tensões (baixa até 1kV e média de 1kV a 35kV) nos sistemas de distribuição de energia elétrica e os desvios permitidos.

A norma europeia estabelece o limite de até 2% durante 95% da semana, medido como a média dos valores eficazes em períodos de 10 minutos. E uma máxima instantânea de 4%.

4.3 HARMÔNICOS

4.3.1 PRODIST - Módulo 8 – Qualidade De Energia Elétrica

Em relação às distorções harmônicas, o módulo 8 apresenta níveis de referência em relação às distorções harmônicas totais de tensão (DHTt) e em relação às distorções harmônicas individuais de acordo com a ordem do harmônico.

As tabelas no Anexo D trazem os valores de referência da DHTt e distorções individuais respectivamente. O módulo 8 não traz valores de referência para as distorções harmônicas de corrente.

4.3.2 IEEE – 519 – 1992 – Recomendação da IEEE

Trata-se de uma recomendação da IEEE, portanto não é uma norma propriamente dita, e recomenda os limites de distorção harmônica de tensão e corrente no ponto de conexão comum (PCC) dos sistemas de energia elétrica.

Tais limites dependem do nível de tensão e de curto-circuito no ponto. Estabelece-se uma relação entre corrente de curto-circuito I_{cc} e corrente de carga, de forma que quanto maior a corrente de curto-circuito em relação à corrente de carga, maior serão as distorções admissíveis no sistema, já que no PCC o efeito da distorção será menor. À medida que a tensão aumenta, os limites de distorção aceitáveis diminuem.

As tabelas no Anexo E representam os limites de distorções harmônicas de corrente para tensões de 120V até maiores de 161kV e os limites de distorções harmônicas de tensão.

Os harmônicos pares são limitados a 25% dos valores indicados.

Observa-se que no caso das distorções de tensão o índice de distorção tolerado é menor do que o de corrente, já que influencia diretamente o funcionamento de equipamentos e desempenho de circuitos.

4.3.3 EN 50160 – Power Quality Standard

A norma europeia EN 50160 define parâmetros de qualidade de energia no PCC, indicando os desvios permitidos. Relativamente aos harmônicos de tensão, durante o período de uma semana, 95% dos valores eficazes de cada harmônico de

tensão (valores médios em cada 10 minutos), não devem ultrapassar os valores indicados na tabela no Anexo F.

4.3.4 IEC 61000-2-2

A norma IEC 61000-2-2 define os níveis de compatibilidade para os harmônicos de tensão para redes de baixa tensão, de acordo com a tabela no Anexo G.

4.3.5 IEC 61000-2-4

A norma IEC 61000-2-4 estabelece os níveis de compatibilidade para redes industriais, de acordo com a tabela 4.

Definem-se três classes com exigência de compatibilidade diferente em função dos ambientes eletromagnéticos possíveis:

- Classe 1: Aplica-se a redes protegidas e tem níveis de compatibilidade mais baixo do que os das redes públicas. Diz respeito à utilização de aparelhos muito sensíveis às perturbações da rede elétrica, como por exemplo: instrumentação de laboratórios tecnológicos, certos equipamentos de automação e de proteção e computadores;
- Classe 2: Esta classe aplica-se aos PCC (Ponto de conexão comum) e aos pontos de ligação interna nos ambientes industriais em geral. Os níveis de compatibilidade desta classe são idênticos aos das redes públicas, pelo que os equipamentos destinados à utilização nestas redes podem ser usados nesta classe de ambiente industrial.
- Classe 3: Esta classe aplica-se somente aos pontos de ligação interna dos ambientes industriais. Os níveis de compatibilidade são superiores aos da classe 2 para certas perturbações. Esta classe deve ser considerada, por exemplo, quando uma das seguintes condições é satisfeita: a maior parte das

cargas é alimentada através de conversores, existem máquinas de solda, ocorrem partidas frequentes de motores de grande potencia e quando as cargas variam rapidamente.

Tabela 4 – Limites de distorção da tensão para redes industriais – IEC 61000-2-4

Distorção harmônica total de tensão (DHTt)	Classe 1	Classe 2	Classe 3
	5%	8%	10%

Fonte: IEC 61000-2-4.

4.3.1 IEC 61000-3-4

Trata-se de uma norma editada pela Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) que se refere às limitações das harmônicas de corrente injetada na rede pública de alimentação, por equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada acima de 16A.

A IEC 61000-3-4 pode ser aplicada a qualquer equipamento elétrico ou eletrônico, cuja corrente de entrada seja maior que 16 A. Sua tensão de alimentação deve ser menor que 240 V para equipamentos monofásicos, ou menor que 600 V para equipamentos trifásicos. A frequência nominal da rede pode ser 50 Hz ou 60 Hz.

São apresentados os limites para distorção harmônica em equipamentos cuja potência aparente seja menor ou igual a 33 vezes a potência de curto-circuito da instalação. A tabela no Anexo H apresenta os limites individuais de corrente para cada harmônico, e estão normalizados em relação à fundamental.

5 MEDIÇÕES, GRÁFICOS E CÁLCULOS

5.1 VISÃO GERAL DAS INSTALAÇÕES

A forjaria escolhida para as medições fica localizada no município de Campo Largo no Paraná, sendo atendida pela Companhia Campolarguense de Energia (COCEL). O estabelecimento possui entrada e medição em alta tensão, como mostra a Figura 26.



Figura 26 – Detalhe da Entrada de Energia

Fonte: Foto do Autor (2013).

Para atender as cargas existem dois transformadores localizados em cabine semi enterrada, conforme Figura 27. Um transformador de 300kVA alimenta o setor de tratamento térmico e a área administrativa. Um segundo transformador de 300kVA alimenta o setor de forja, onde se encontra o forno a indução utilizado nas medições.



Figura 27 – Detalhe da Cabine dos Transformadores

Fonte: Foto do Autor (2013).

O forno a indução é alimentado pelo Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) do transformador de 300kVA, ilustrado na Figura 28. O quadro é protegido por fusível tipo NH de 800A. Um disjuntor de 600A protege o circuito que alimenta o forno a indução. Outros cinco disjuntores protegem os circuitos que alimentam as prensas e o quadro de iluminação.

Na Figura 29 pode-se observar o forno a indução em funcionamento, com detalhe da bobina de aquecimento na Figura 30. A bobina aquecimento utilizada no momento das medições possuía 22 espiras com 15 cm de diâmetro. O barramento condutor da bobina possui um formato quadrado com dimensão de 8 cm de lado e 1cm de espaçamento entre as espiras.

Existe um banco de capacitores para correção do fator de potência do forno a indução (Figura 31), um módulo de 15Kvar e um módulo de 7,5Kvar com tensão nominal de 220V. Porém, este banco queimou há alguns meses e não foi substituído. Sabe-se que o banco de capacitores queimou após a instalação do forno a indução e durante o seu período funcionamento. Desta forma pode-se destacar como causa provável de queima do banco o fato de as distorções harmônicas causadas pelo forno a indução entrarem em ressonância com o banco de capacitores, assim, certas harmônicas podem ser amplificadas, gerando tensões e

correntes muito elevadas, que podem provocar avarias catastróficas ao banco de capacitores, levando-os à queima.

Uma das maneiras mais simples de minimizar os riscos causados aos capacitores pelas distorções harmônicas é dimensionar capacitores de tensão nominal maior do que a tensão nominal da unidade. Por suportarem uma tensão maior, os capacitores de 380V ou 440V vão sentir menos os impactos da sobretensão causada pela ressonância das componentes harmônicas.

Ao se ligar um capacitor em uma rede com tensão nominal menor do que a tensão nominal do capacitor, a sua potencia eficaz é reduzida. Um capacitor de 380V instalado em uma rede de 220V tem sua potência reduzida em 66,5%, enquanto que um capacitor de 440V ligado em uma rede de 220V tem sua potência reduzida em 75%. Desta forma, para se obter os 22,5Kvar existentes seria necessário instalar um banco de 70Kvar com tensão nominal de 380V ou um banco de 90Kvar com tensão nominal de 440V. Quanto maior for a tensão nominal dos capacitores maior será a sua tolerância às sobretensões, porém maior será também o custo de instalação do banco.

Antes da instalação do forno a indução, esta forjaria utilizava um forno a gás. Pelos motivos já descritos anteriormente sobre as vantagens do aquecimento indutivo, o sistema a gás foi substituído pelo sistema de aquecimento indutivo. O antigo forno a gás, embora desativado, ainda se encontra na forjaria e esta ilustrado na Figura 32.



Figura 28 – Detalhe do QGBT

Fonte: Foto do Autor (2013).



Figura 29 – Detalhe do Forno a Indução em Funcionamento

Fonte: Foto do Autor (2013).



Figura 30 – Detalhe da Bobina de Aquecimento

Fonte: Foto do Autor (2013).



Figura 31 – Banco de Capacitores Desativado

Fonte: Foto do Autor (2013).



Figura 32 – Detalhe do Antigo Forno a Gás

Fonte: Foto do Autor (2013).

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 Equipamentos Utilizados

Para as medições foi utilizado um analisador de energia modelo RE6000 da fabricante Embrasul, Figura 33. O equipamento é capaz de registrar potências ativas, reativas e aparentes, níveis de tensão, variações de tensão de curta duração, desequilíbrios de tensão, corrente elétrica, fator de potência, frequência da linha, distorções harmônicas totais de tensão e de corrente e espectro de frequência de distorções harmônicas de tensão e corrente.



Figura 33 – Detalhe do Analisador de Energia

Fonte: Foto do Autor (2013).

Para a medição das correntes foi utilizado um sensor de corrente flexível modelo TI 3000 de fabricação da Embrasul, Figura 34. Possui relação de transformação de 3000/5A. Seu funcionamento, baseado no princípio da Bobina de Rogowski, permite medir a corrente líquida do barramento independente da geometria do condutor, permitindo flexionar o sensor para melhor adaptar-se às condições do barramento.

Como Equipamentos de Proteção Individual (EPI) foi utilizado luvas de borracha isolante para até 1000V, óculos de proteção, capacete de segurança e bota isolante, representados na Figura 35.



Figura 34 – Detalhe dos Sensores de Corrente

Fonte: Foto do Autor (2013).



Figura 35 – Detalhe dos Equipamentos de Proteção Individual

Fonte: Foto do Autor (2013).

5.2.2 Conexão do Analisador de Energia

O analisador de energia foi instalado no QGBT antes do disjuntor de 600A que alimenta o forno a indução. A Figura 36 representa de forma geral as conexões da medição.

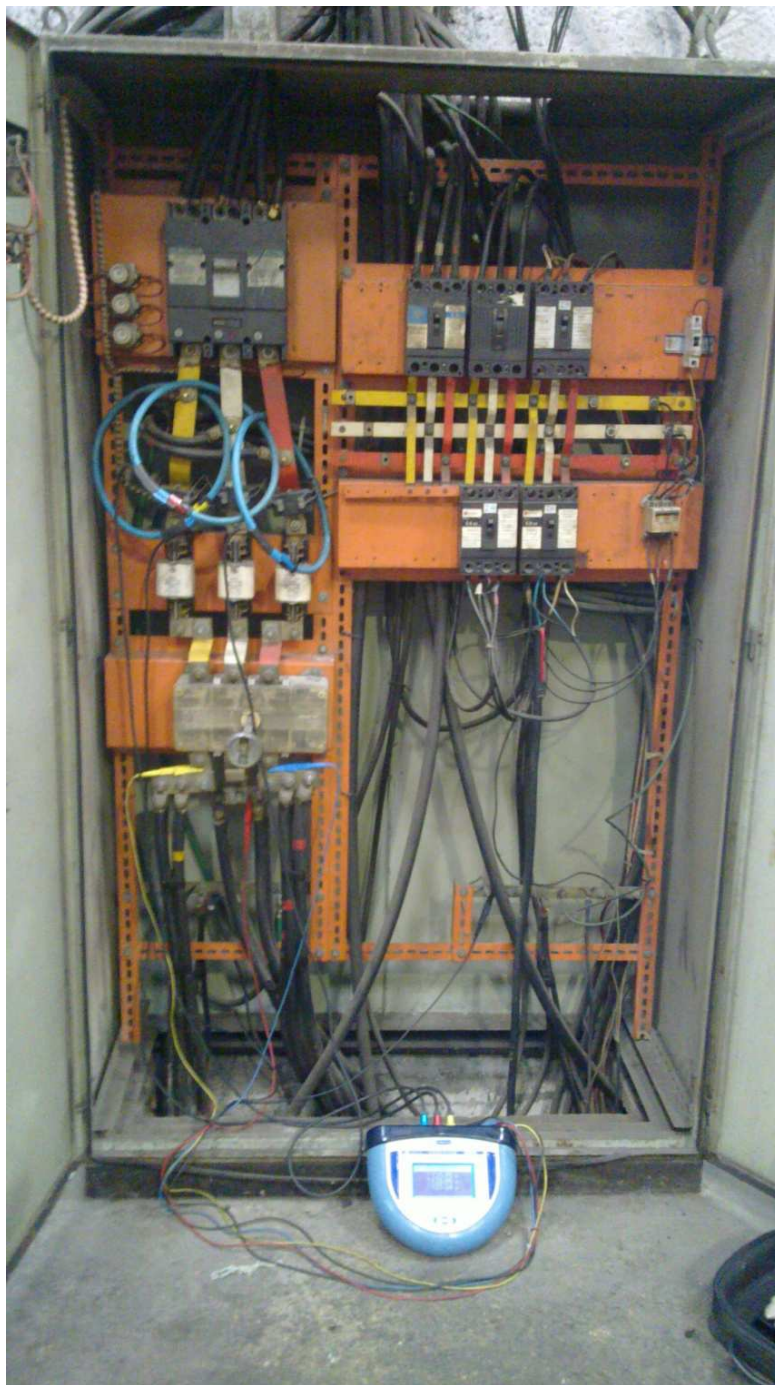


Figura 36 – Detalhe da Conexão do Analisador de Energia
Fonte: Foto do Autor (2013).

A Figura 37 representa em detalhe a conexão dos sensores de corrente nos barramentos antes da entrada do disjuntor do forno. Foi instalado um sensor de corrente em cada barramento de cada fase. Por motivos de convenção o barramento do lado esquerdo (amarelo) será chamado de Fase A, o barramento central (branco) de Fase B e o barramento do lado direito (vermelho) de Fase C. Observa-se que os sensores de corrente foram posicionados após os condutores de derivação para o barramento horizontal localizado no lado direito, desta forma a corrente medida é exclusivamente do circuito do forno a indução.

Pelas características de funcionamento desse sensor de corrente não é necessário que os condutores estejam geometricamente posicionados no centro do sensor.

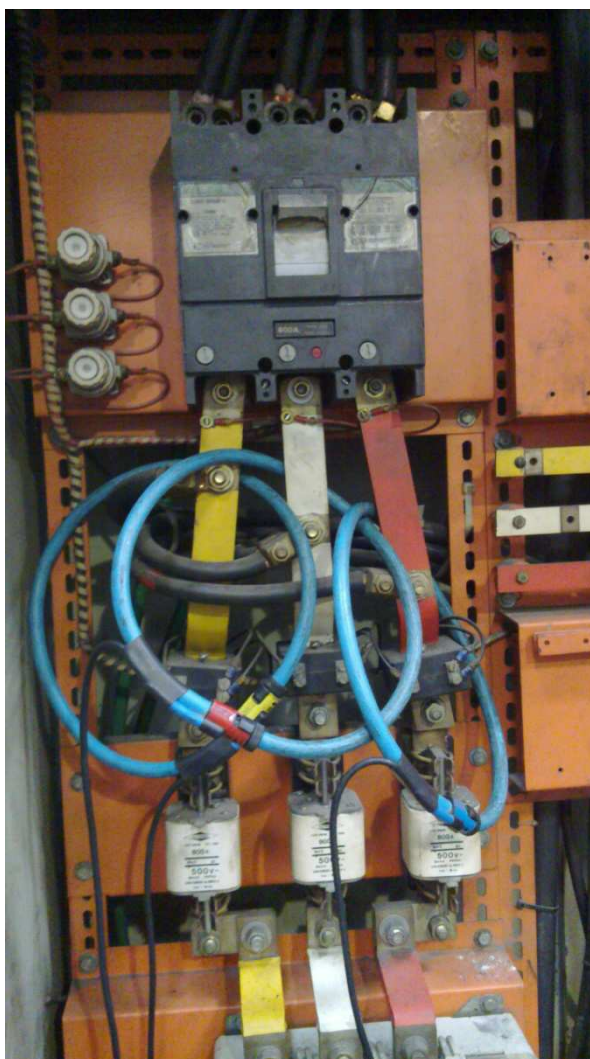


Figura 37 – Detalhe da Conexão dos Sensores de Corrente

Fonte: Foto do Autor (2013).

A conexão dos pontos de análise de tensão esta representada na Figura 38. Foi conectado um ponto em cada fase, além da conexão de um ponto no barramento de neutro e um ponto no barramento de terra do QGBT.

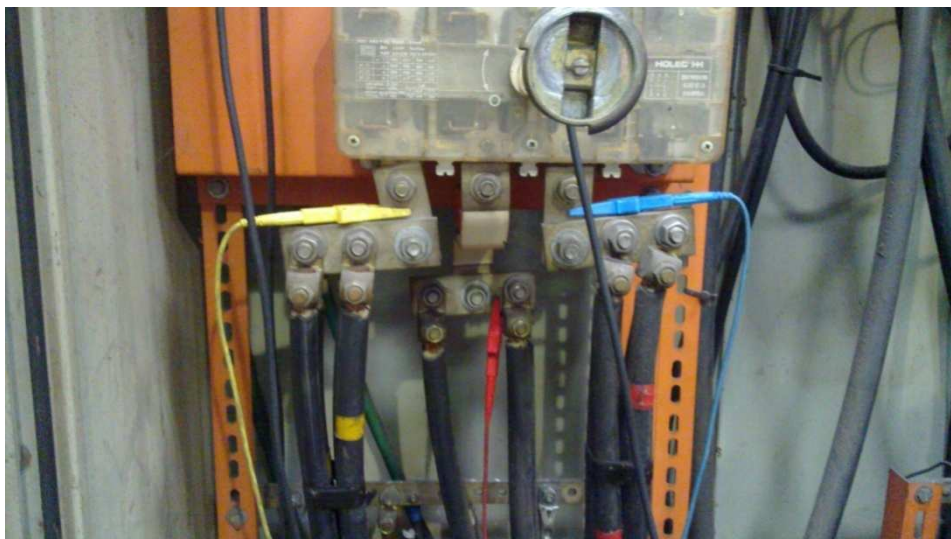


Figura 38 – Detalhe da Conexão dos Pontos de Tensão

Fonte: Foto do Autor (2013).

5.2.3 Parâmetros da Medição e Convenções de Análise

A medição foi efetuada no dia 15 de Julho de 2013, começando o registro às 11h13m. O analisador registrou os dados até as 12h03m do mesmo dia, resultando em 50 minutos de medição.

Cada processo de aquecimento leva 2 minutos e 30 segundos, com um intervalo médio de recarga da máquina de 39 segundos. Desta forma foram registrados 15 processos completos de aquecimento do forno a indução. Foi optado por se medir vários processos de aquecimento para que se possa constatar que existe um padrão consistente de funcionamento do forno.

As medições foram efetuadas em intervalos de integração de cinco décimos de segundo. Foi adotado um pequeno intervalo de integração para que se possa verificar as variações das grandezas elétricas com uma maior definição, além de ser possível, desta forma, identificar variações bruscas das grandezas.

O gráfico ilustrado na Figura 39 representa a potência ativa durante todo o período de medição. Os números (1 à 15) indicam de forma sequencial os quinze processos completos de aquecimento registrados. Observa-se que esses processos seguem um padrão bem definido, possuindo tempos regulares de aquecimento e recarga do forno.

Desta forma, para uma análise mais detalhada das grandezas elétricas medidas optou-se pela análise dos processos de número seis, sete, oito e nove, sabendo que esta amostra se revela válida para todo o período de medição. Assim, no próximo capítulo estarão representados nos gráficos apenas esses processos.

O período do aquecimento em que a potências ativa se encontra na faixa de 150kW será chamado de “primeiro estágio de aquecimento”, o período em que a potência se encontra na faixa de 85kW será chamado de “segundo estágio de aquecimento”, o período em que a potência se encontra na faixa de 45kW será chamado de “terceiro estágio de aquecimento” e o período do aquecimento em que a potência se encontra na faixa de 5 kW será chamado de “período de recarga do forno”.

Para uma melhor visualização no domínio do tempo será adotado o tempo igual a zero segundos para o início do processo de número seis, sendo contado até o final do processo de número nove.

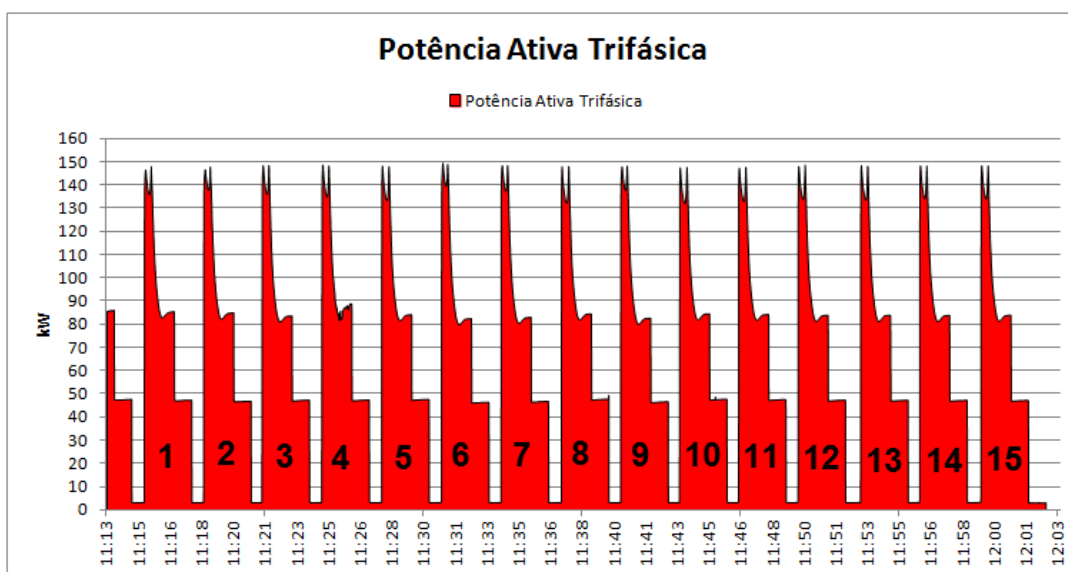


Figura 39 – Gráfico da Potência Ativa dos Processos de Aquecimento

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

5.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

As medições indicadas nesse capítulo correspondem aos processos de aquecimento de número seis, sete, oito e nove, definidos no item anterior. No total destes quatro processos de aquecimento foram registrados 1.513 dados de cada uma das 32 grandezas registradas, resultando em 48.416 registros.

5.3.1 Potências e Fator de Potência

A potência nominal do forno é de 150kW, constatou-se pela medição que essa potência é atingida somente no primeiro estágio de aquecimento. Durante o restante do aquecimento a potência ativa assume valores de 80kW e 45kW que correspondem aos segundo e terceiro estágio de aquecimento respectivamente. Durante o período de recarga o forno trabalha com um potência média de 3kW.

A potência aparente fica na margem dos 160kVA durante o primeiro estágio de aquecimento, isso é resultado do baixo fator de potência em que o forno trabalha.

No momento de maior solicitação de carga o fator de potência trabalha na faixa de 0,89, caindo para 0,84 e 0,79 nos próximos estágios de aquecimento. Durante o período de recarga a fator de potência fica em 0,59. Essa diferença se dá do fato de que quando o forno está em operação o processo de aquecimento faz com que ele se comporte como uma carga resistiva em virtude do “curto-circuito” causado no metal que está sendo aquecido.

Antigamente, o banco de capacitores corrigia este fator de potência. Como a queima do banco foi pouco tempo após a instalação do forno a indução uma das hipóteses da queima é que eles tenham entrado em ressonância com as componentes harmônicas amplificando-as, gerando sobre tensão e sobre corrente no banco, causando a sua queima.

A Figura 40 representa as potências ativas e aparentes demandadas pelo forno, e a Figura 41 ilustra o fator de potência.

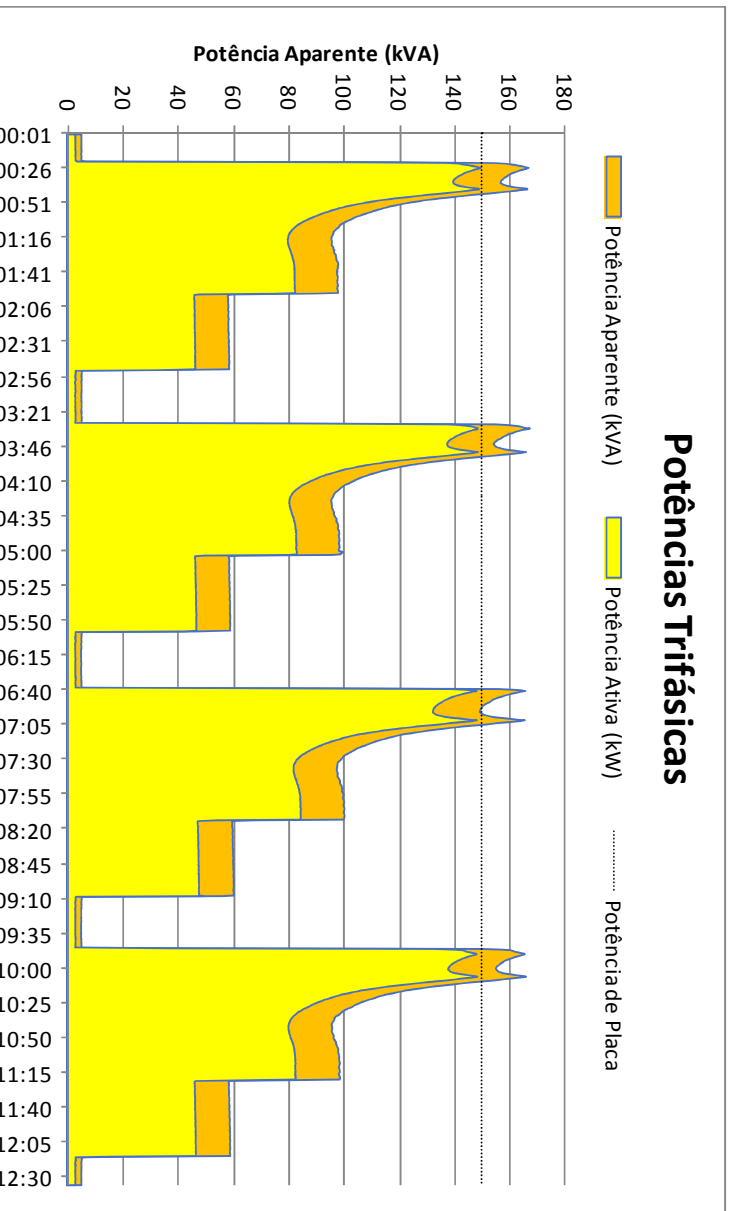


Figura 40 – Gráfico da Potência Ativa e Reativa
 Fonte: Gráfico do Autor (2013).

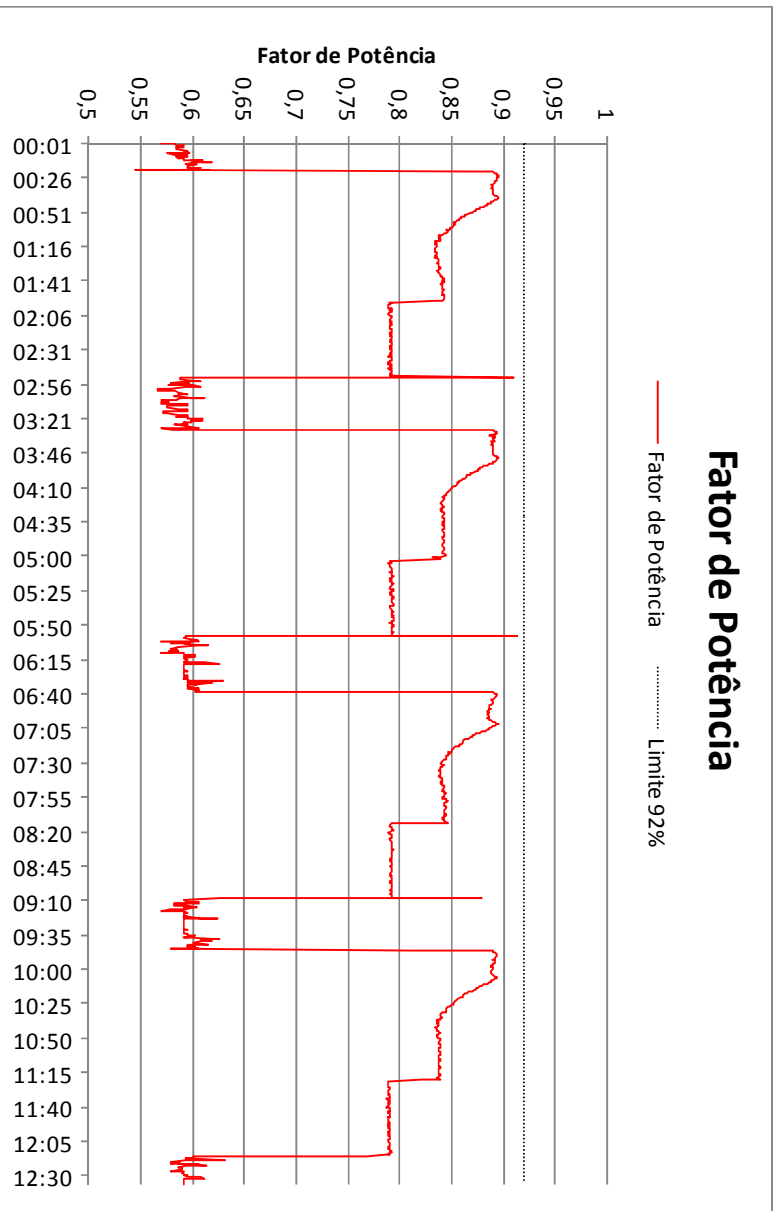


Figura 41 – Gráfico do Fator de Potência
 Fonte: Gráfico do Autor (2013).

5.3.2 Níveis de Tensão

A tensão nominal do barramento do QGBT onde foram efetuadas as medições é de 220 V entre fases e 127 V entre fase e neutro. A análise deste parâmetro permite identificar se existem variações de curta e longa duração e qual a magnitude da queda de tensão nos momentos de maior solicitação de carga.

Os gráficos da Figura 42 e Figura 43 ilustram respectivamente os níveis de tensão de fase e os níveis de tensão de linha.

A tensão fase-fase medida variou entre +1,55% e -2,44% em relação a nominal (220 V), valores estes que correspondem a 223,40 V e 214,64 V respectivamente. A tensão fase-neutro medida variou entre +0,97% e -2,35% em relação a nominal (127 V), valores que correspondem a 128,23 V e 124,02 V respectivamente. Na média as tensões fase-fase e fase-neutro foram respectivamente 218,71V e 126,18, que correspondem a +0,59% e +0,64%.

Comparando os resultados das medições com os parâmetros recomendados por normas nacionais e internacionais (Tabela 5) conclui-se que os níveis de tensão estão dentro das faixas consideráveis normais e adequadas.

Percebe-se pelos gráficos que existe uma queda de tensão durante o acionamento do forno, que vai sendo reduzida conforme a potência requerida vai diminuindo. O fato de o transformador que alimenta o forno estar a apenas 10 metros do QGBT favorece para que esta queda de tensão seja pequena.

Tabela 5 – Comparação dos Níveis de Tensão Registrados com as Normas Correspondentes

Medição				Norma de Análise			
Nominal	Medido	% da Nominal	PRODIST M. 8	EN 50160	IEC 61000	NBR 5410	
			Valores Adequados	Valores Normais	Valores Normais	Queda de Tensão Máxima	
Linha (220 V)	Máximo	223,4 V	1,55%	$201 \leq TL \leq 231$	$\pm 5\%$	$\pm 3\%$	-3%
	Mínimo	214,64 V	-2,44%				
	Média	218,71 V	0,59%				
Fase (127)	Máximo	128,23 V	0,97%	$116 \leq TL \leq 133$	$\pm 5\%$	$\pm 3\%$	-3%
	Mínimo	124,02 V	-2,35%				
	Média	126,18 V	0,64%				

Fonte: Tabela do Autor (2013).

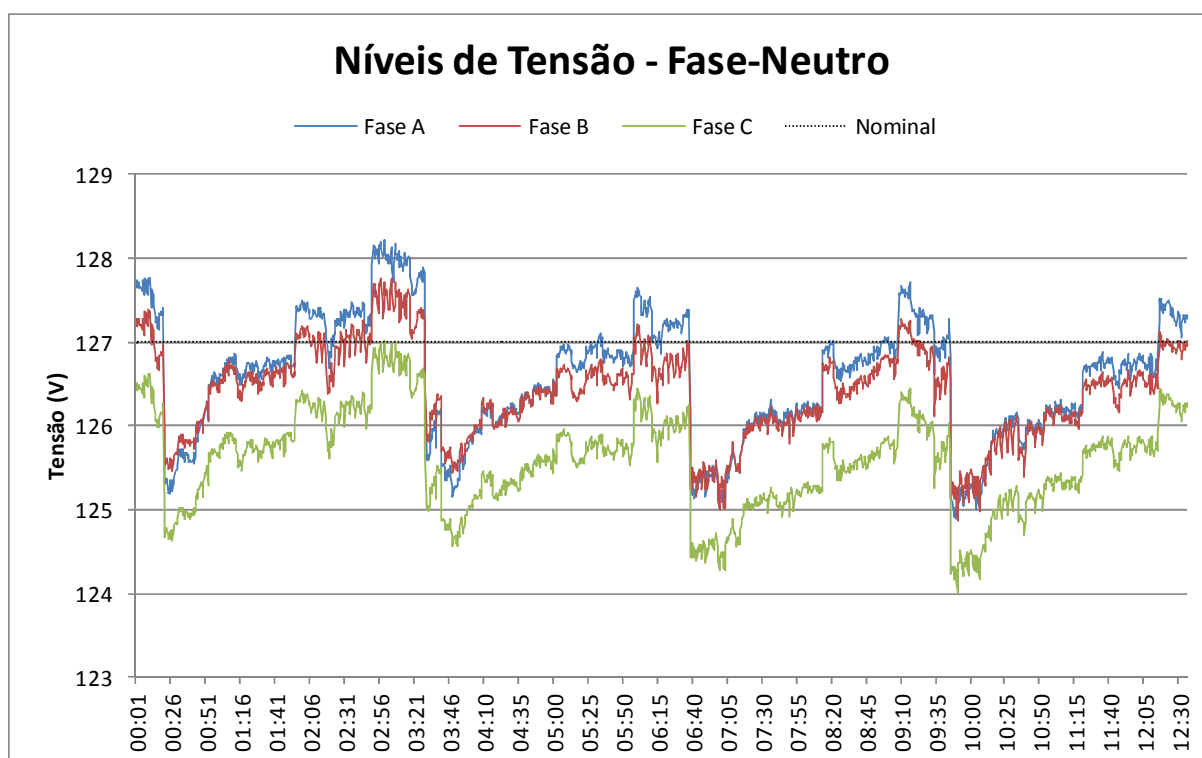


Figura 42 – Gráfico dos Níveis de Tensão de Fase

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

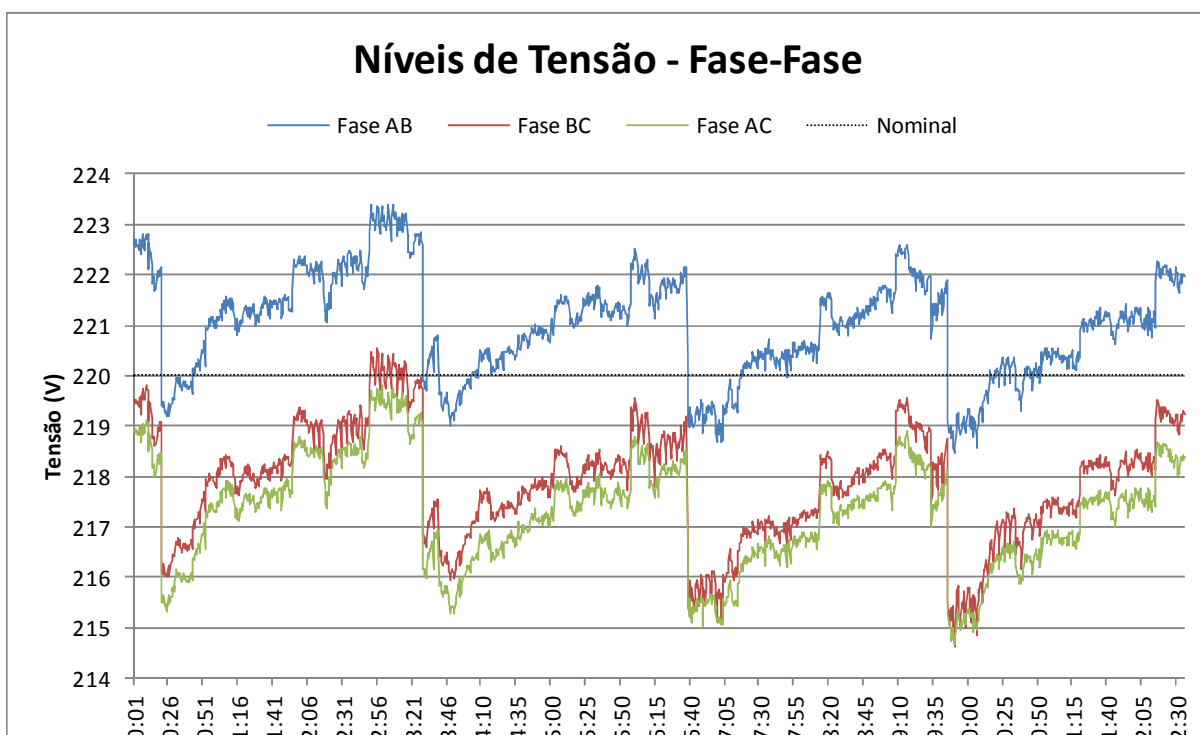


Figura 43 – Gráfico dos Níveis de Tensão de Linha

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

5.3.3 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão foi calculado conforme o método definido pela “National Electrical Manufacturers Association of USA” (NEMA) e conforme o método definido pelo IEC, conforme ilustrado na Figura 44.

O máximo desequilíbrio de tensão registrado pelos métodos NEMA e IEC foi respectivamente de 1,18% e 1,19%. Na média ficou respectivamente em 1,04% e 1,06%.

Comparando os resultados das medições com o parâmetro estabelecido pela EN 50160 (Tabela 6) conclui-se que os níveis de desequilíbrio de tensão estão dentro da faixa de até 2% considerada aceitável.

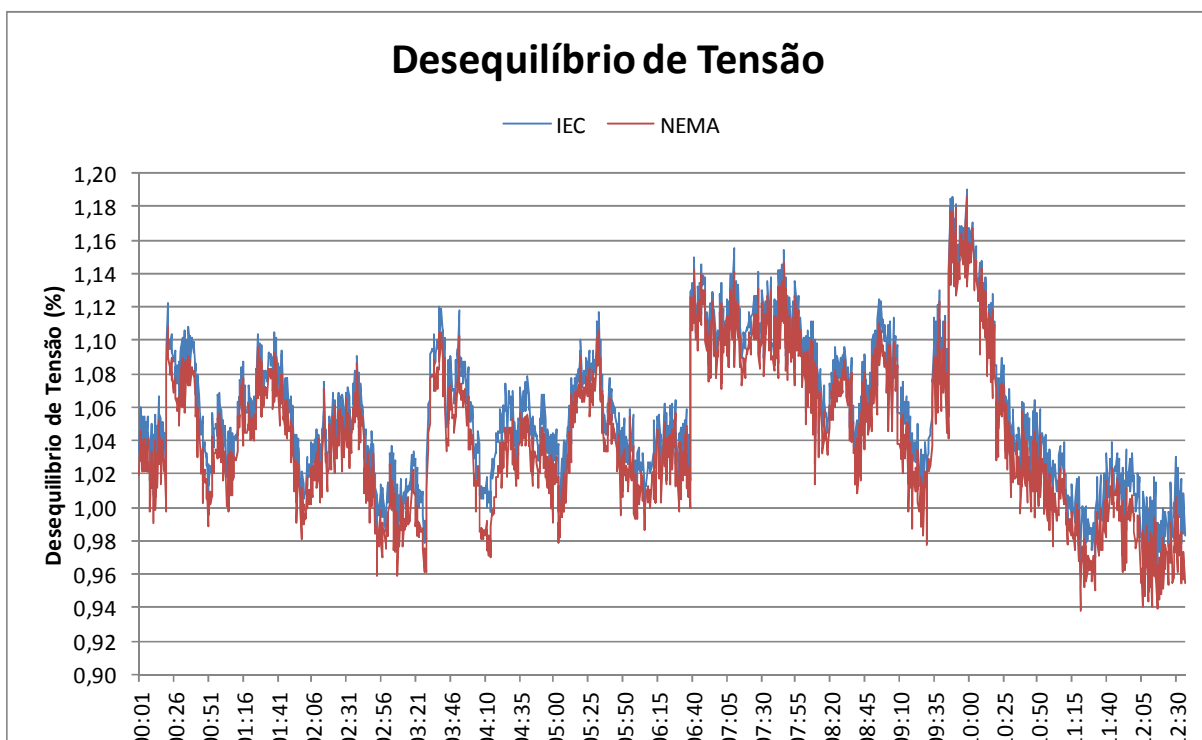


Figura 44 – Gráfico do Desequilíbrio de Tensão

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

Tabela 6 – Comparação dos Níveis de Desequilíbrio de Tensão com a Norma EN 50160

Medição		Norma de Análise
Método de Medição		EN 50160
NEMA	Máximo	1,18
	Mínimo	0,94
	Média	1,04
IEC	Máximo	1,19
	Mínimo	0,96
	Média	1,06
		Menor do que 2%

Fonte: Tabela do Autor (2013).

5.3.4 Níveis de Corrente

A análise da corrente de cada fase permite verificar eventuais desequilíbrios de carga entre as fases e picos de corrente durante o funcionamento do forno. Picos de corrente, quando muito elevados, podem resultar em acionamentos indevidos dos dispositivos de proteção.

O gráfico na Figura 45 ilustra os níveis de corrente em cada uma das fases.

Não se verifica picos momentâneos de corrente. Os desequilíbrios médios entre as fases ficaram na ordem de 11,53 A entre as fases AB, 2,08 A para as fases BC e 9,45 A para as fases AC.

O disjuntor que protege o circuito do forno de indução é de 600A, desta forma conta-se que o circuito está trabalhando com uma folga de aproximadamente 25%.

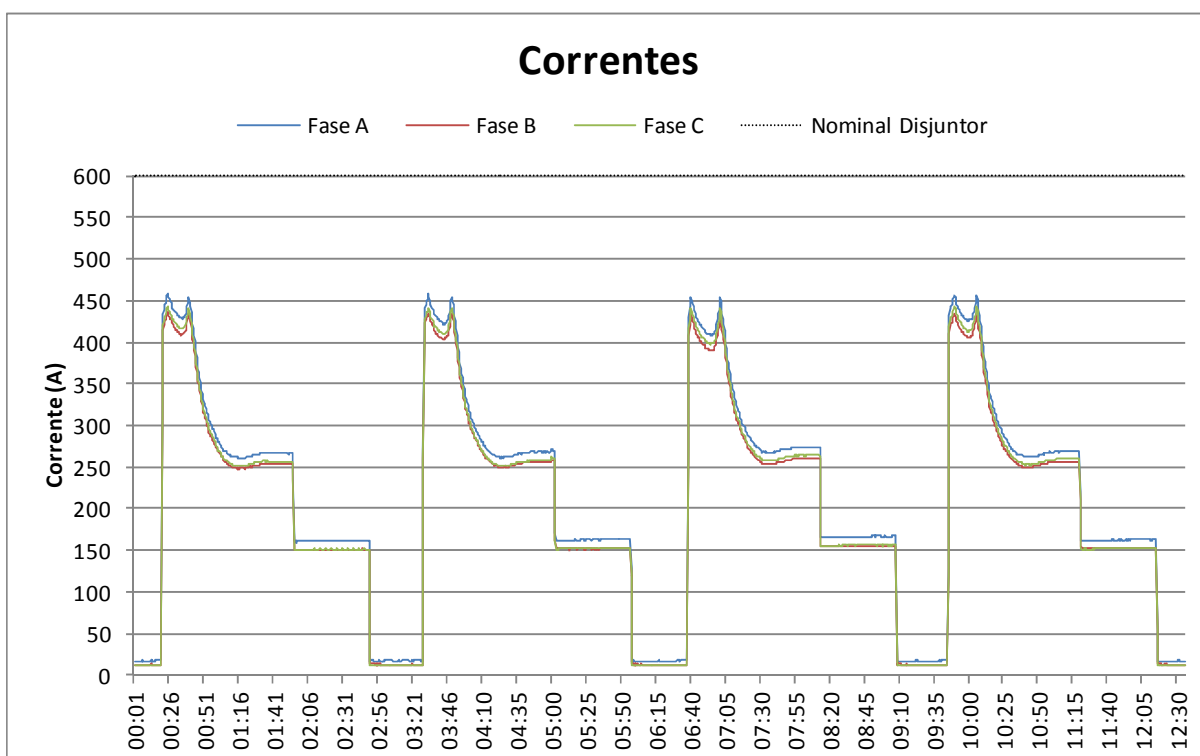


Figura 45 – Gráfico dos Níveis de Corrente

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

5.3.5 Distorções Harmônicas de Tensão

5.3.5.1. Distorções Harmônicas Totais de Tensão (DHTt)

O gráfico da Figura 46 permite visualizar os níveis de distorções harmônicas totais de tensão em cada uma das fases. Verifica-se que quanto maior a potência com que o forno está trabalhando maiores são as distorções harmônicas de tensão. Comparando-se as distorções harmônicas entre as fases, observa-se que as três seguem o mesmo padrão, embora a fase A possua um nível de distorção mais elevado do as fases B e C.

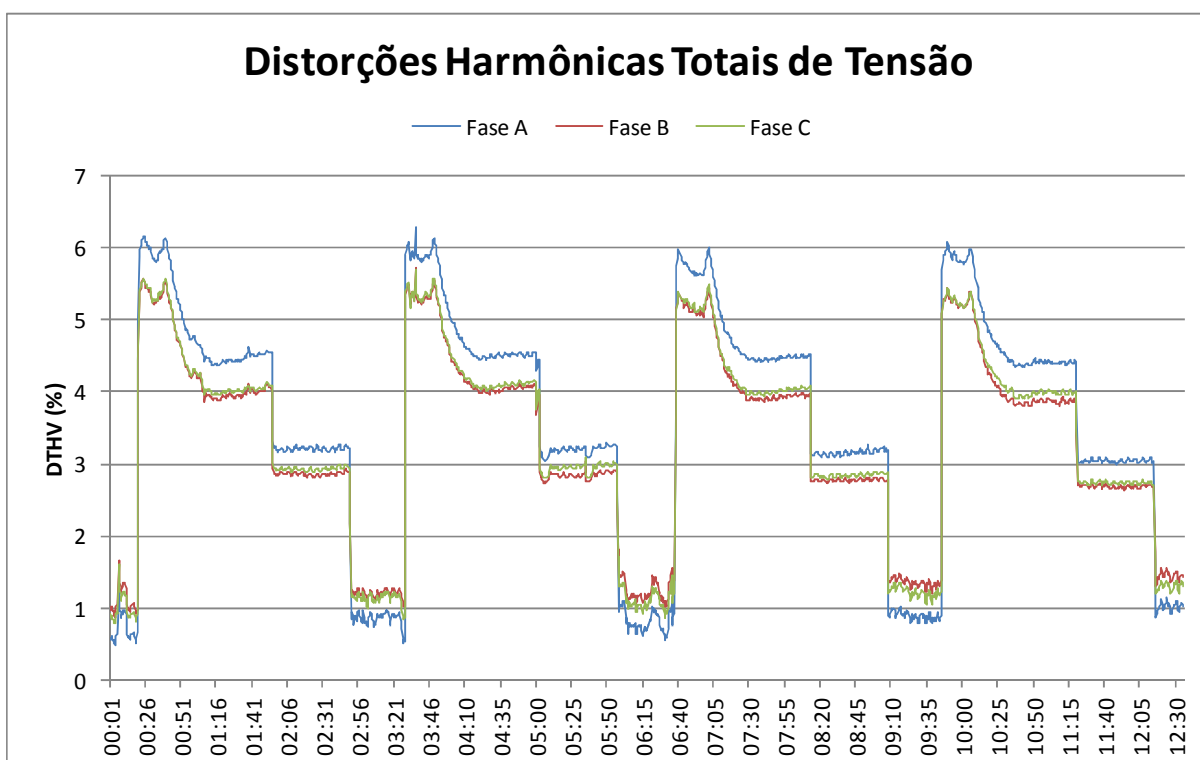


Figura 46 – Gráfico das Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

A Tabela 7 traz a comparação entre os resultados obtidos com a medição e os valores recomendados pelas principais normas do assunto. Em três, das quatro normas escolhidas, os valores máximos medidos estão dentro dos limites aceitáveis. Somente na norma do IEEE os valores ficam acima do recomendado.

Tabela 7 – Comparação da DHTt com as Norma Correspondentes

Medição				Norma de Análise			
	Fase A	Fase B	Fase C	PRODIST M.8	IEEE 519	EN 50160	IEC 61000-2-4
Máximo	6,28%	5,72%	5,70%	< 10%	< 5%	< 8%	< 10%
Mínimo	0,48%	0,88%	0,78%				
Média	3,57%	3,28%	3,30%				

Fonte: Tabela do Autor (2013).

5.3.5.2. Espectro de Frequência de Tensão

A caracterização do espectro de frequência permite avaliar qual é a ordem das componentes harmônicas que contribuem para a distorção harmônica total. Permite avaliar também qual a magnitude de cada uma destas componentes. Para este estudo foi considerado somente o período de funcionamento do forno, sendo descartado o período de recarga do forno.

Os gráficos das Figura 47, Figura 48 e Figura 49 representam o espectro harmônico de tensão das fases A, B e C respectivamente. Foram considerados os valores máximos de cada ordem harmônica. A Tabela 8 compara os valores medidos com as recomendações de normas técnicas sobre o assunto.

Através da comparação dos resultados com as normas observa-se que de modo geral as componentes harmônicas se encontram dentro dos parâmetros recomendados. Embora estejam presentes, não são as harmônicas de tensão o fator crítico no que se diz respeito ao problema de qualidade de energia elétrica em fornos a indução.

Tabela 8 – Comparação das Componentes Harmônicas de Tensão com as Normas

Medição				Norma de Análise			
Ordem da Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	PRODIST M.8	IEEE 519	EN 50160	IEC 61000-2-2
3°	0,53%	0,44%	0,36%	6,5%	3%	5,0%	5,0%
5°	5,26%	4,72%	4,43%	7,5%		6,0%	6,0%
7°	2,87%	2,57%	2,67%	6,5%		5,0%	5,0%
9°	0,00%	0,38%	0,00%	2,00%		1,5%	1,5%
11°	1,74%	1,59%	1,78%	4,5%		3,5%	3,5%
13°	0,97%	1,06%	1,07%	4,0%		3,0%	3,0%
15°	0,00%	0,00%	0,00%	1,00%		0,5%	0,3%
17°	0,94%	1,13%	1,35%	2,5%		2,0%	2,0%
19°	0,76%	0,84%	0,92%	2,0%		1,5%	1,5%
21°	0,00%	0,00%	0,00%	1,00%		0,5%	0,2%
23°	0,43%	0,98%	0,81%	2,0%		1,5%	1,5%
25°	0,6%	0,66%	0,80%	1,5%		1,5%	1,5%
27°	0,00%	0,00%	0,00%				
29°	0,39%	0,69%	0,41%				
31°	0,42%	0,39%	0,54%				
33°	0,00%	0,00%	0,00%				
35°	0,37%	0,46%	0,00%				
37°	0,00%	0,00%	0,00%				
39°	0,00%	0,00%	0,00%				
41°	0,35%	0,00%	0,00%				
43°	0,00%	0,00%	0,00%				
45°	0,00%	0,00%	0,00%				
47°	0,35%	0,00%	0,00%				
49°	0,00%	0,00%	0,00%				

Fonte: Tabela do Autor (2013).

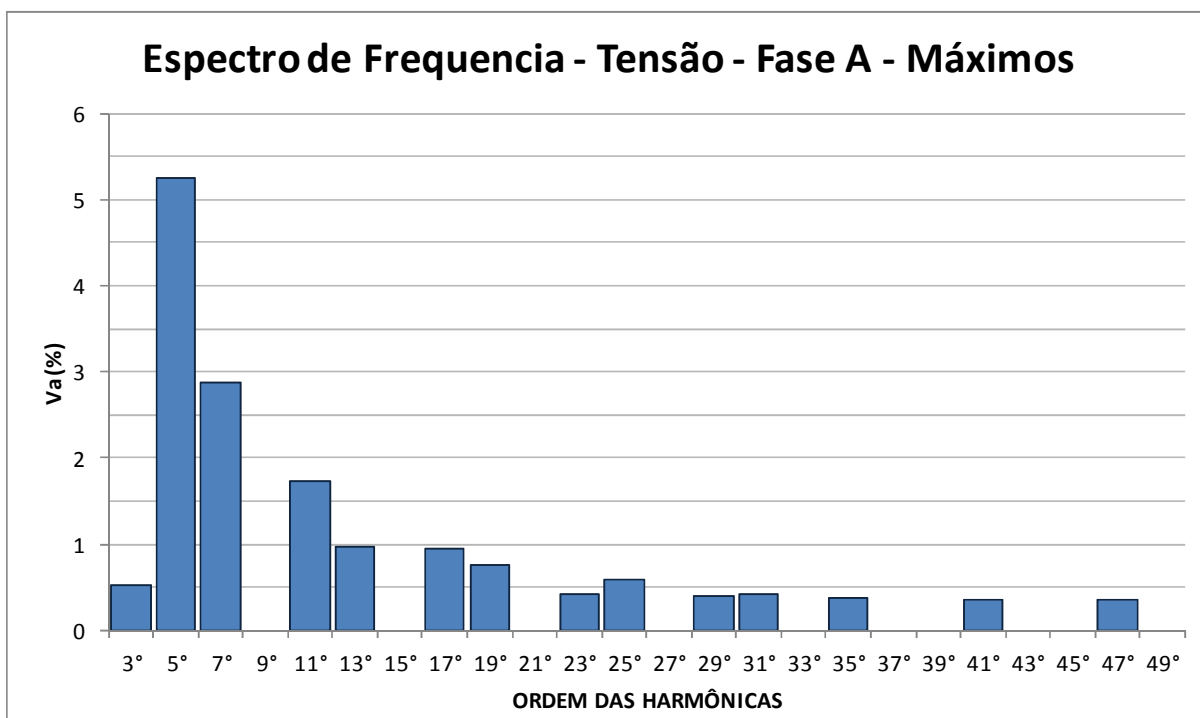


Figura 47 – Espectro de Frequência de Tensão – Fase A – Valores Máximos

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

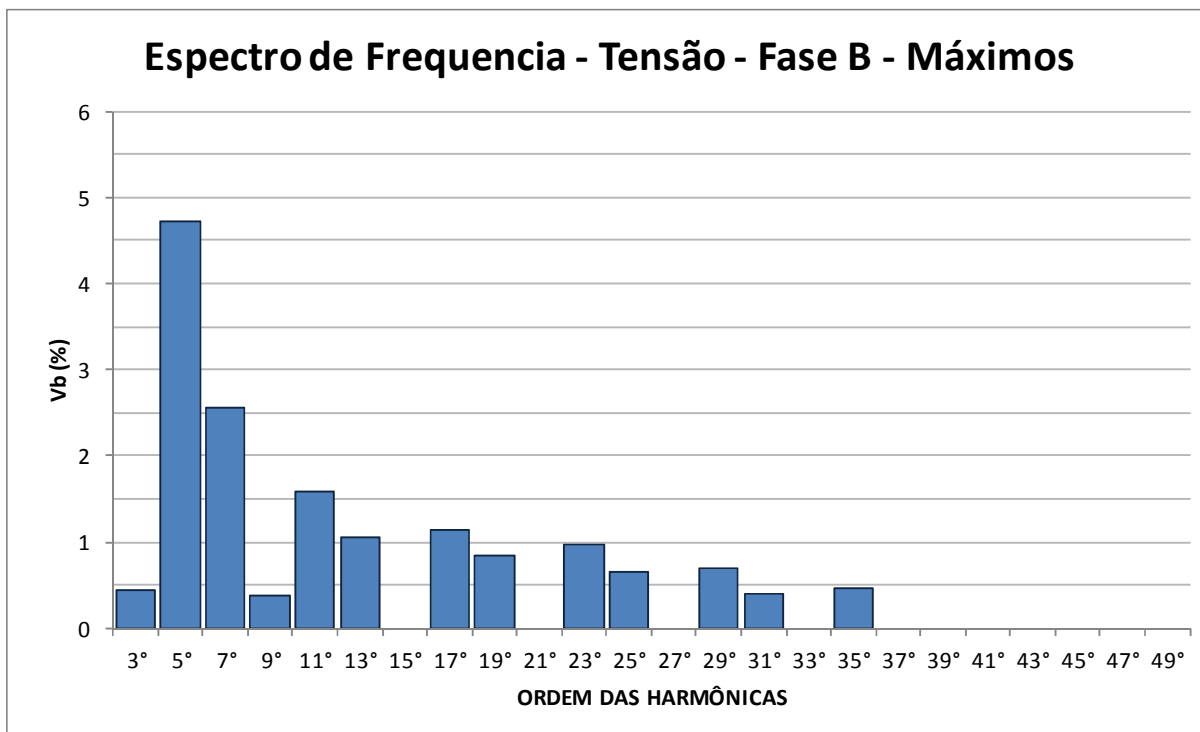


Figura 48 – Espectro de Frequência de Tensão – Fase B – Valores Máximos

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

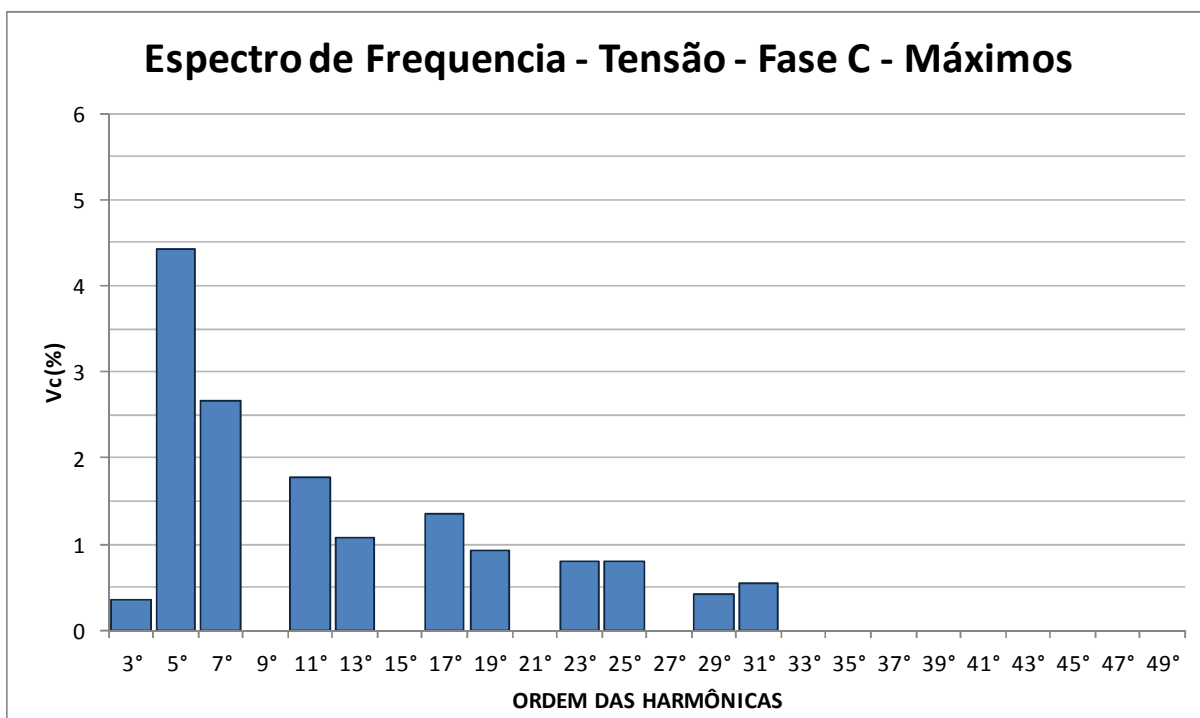


Figura 49 – Espectro de Frequência de Tensão – Fase C – Valores Máximos

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

5.3.6 Distorções Harmônicas de Corrente

5.3.6.1. Distorções Harmônicas Totais de Corrente (DHTi)

O gráfico da Figura 50 permite visualizar os níveis de distorções harmônicas totais de corrente em cada uma das fases. Os resultados apresentados são os percentuais que o valor eficaz da DHT representa perante o valor eficaz da componente fundamental.

Verifica-se que a DHTi é maior para o terceiro estágio de aquecimento e menor para o primeiro estágio de aquecimento. Isso se deve ao fato de que no terceiro estágio de aquecimento o valor eficaz da componente fundamental é menor. Como a DHT é calculada em relação a componente fundamental, uma componente harmônica de determinado valor eficaz representa um acréscimo maior para a DHT quando o valor eficaz de sua componente fundamental é menor. Embora tanto o valor eficaz da componente fundamental quanto o valor eficaz das outras ordens harmônicas decresçam de um estágio para o outro, ela não decrescem na mesma taxa. A componente fundamental decresce mais do que as outras componentes, desta forma estas componentes harmônicas representam um valor percentual maior perante a componente fundamental.

Mesmo durante o processo de recarga do forno os níveis de distorções são consideráveis. Comparando-se as distorções harmônicas entre as fases, observa-se que as três seguem o mesmo padrão, embora a fase A possua um nível de distorção menor do que as fases B e C.

Diferentemente das distorções de tensão, existem menos normas e recomendações acerca dos limites aceitáveis de DHTi. A Tabela 9 traz a comparação entre os resultados obtidos com a medição e os valores recomendados pela IEEE 519. A recomendação da IEEE não se trata exatamente no nível de DHTi, mas sim da distorção de demanda total (TDD). A DHTi é calculada em relação ao valor eficaz da componente fundamental, enquanto que a TDD é calculada em relação a corrente demandada.

Levando-se em conta que durante o primeiro estágio de aquecimento o forno trabalha com sua potência nominal, a corrente fundamental neste momento é aproximadamente igual à corrente demandada. Desta forma, pode-se dizer que, no primeiro estágio de aquecimento, as distorções harmônicas totais (DHT) são semelhantes à distorção de demanda total (TDD), tornando a comparação com a IEEE 519 válida. Portanto, na tabela 9 os valores máximos, médios e mínimos medidos correspondem somente ao primeiro estágio de aquecimento.

O IEEE recomenda os valores em relação à razão do nível de curto circuito do ponto e da corrente demandada total. Considerando como corrente demandada total a corrente de 393A que é resultante da potência nominal do forno de 150kW, e o nível de curto circuito como sendo a corrente máxima de interrupção do disjuntor que é de 30kA, chega-se a uma razão de 76, que resulta em um limite de TDD de 12% (conforme anexo E).

Comparando-se os resultados obtidos com o valor recomendado pela IEEE, observa-se que os níveis de distorções harmônicas de corrente estão bem acima da recomendação. Desta maneira pode-se constatar que o funcionamento do forno a indução realmente gera elevadas distorções harmônicas de corrente, como já era previsto através da literatura estudada sobre o assunto.

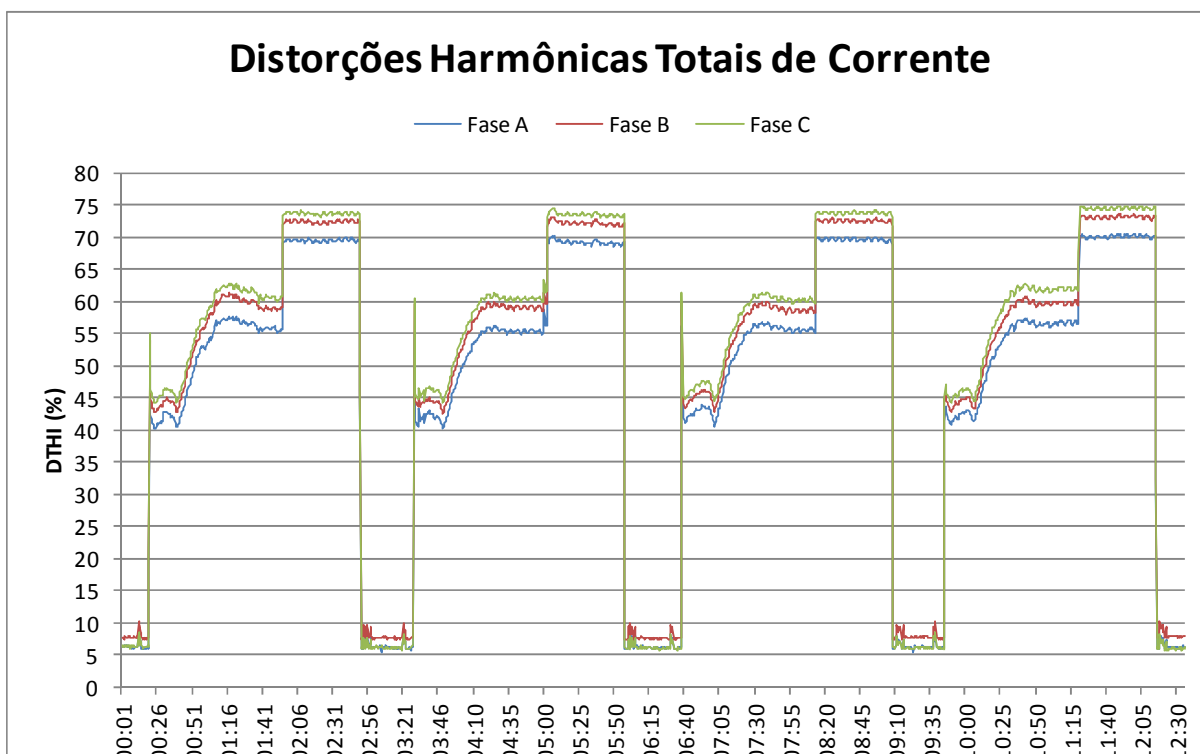


Figura 50 – Gráfico das Distorções Harmônicas Totais de Corrente

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

Tabela 9 – Comparação da DTHi com a Norma IEEE 519

	Medição			Norma de Análise
	Fase A	Fase B	Fase C	IEEE 519 (TDD)
Máximo	50,90%	53,93%	55,20%	< 12%
Mínimo	40,12%	42,46%	44,12%	
Média	42,12%	44,42%	45,89%	

Fonte: Tabela do Autor (2013).

5.3.5.3. Formas de Onda de Corrente

A Figura 51, Figura 52 e Figura 53 representam, respectivamente, as formas de onda de tensão das Fases A, B e C durante o terceiro estágio de aquecimento do forno. Observa-se que o formato da forma de onda se apresenta tão deformado que deixou de ter um aspecto de senoide.



Figura 51 – Forma de Onda de Corrente – Fase A

Fonte: Foto do Autor (2013).

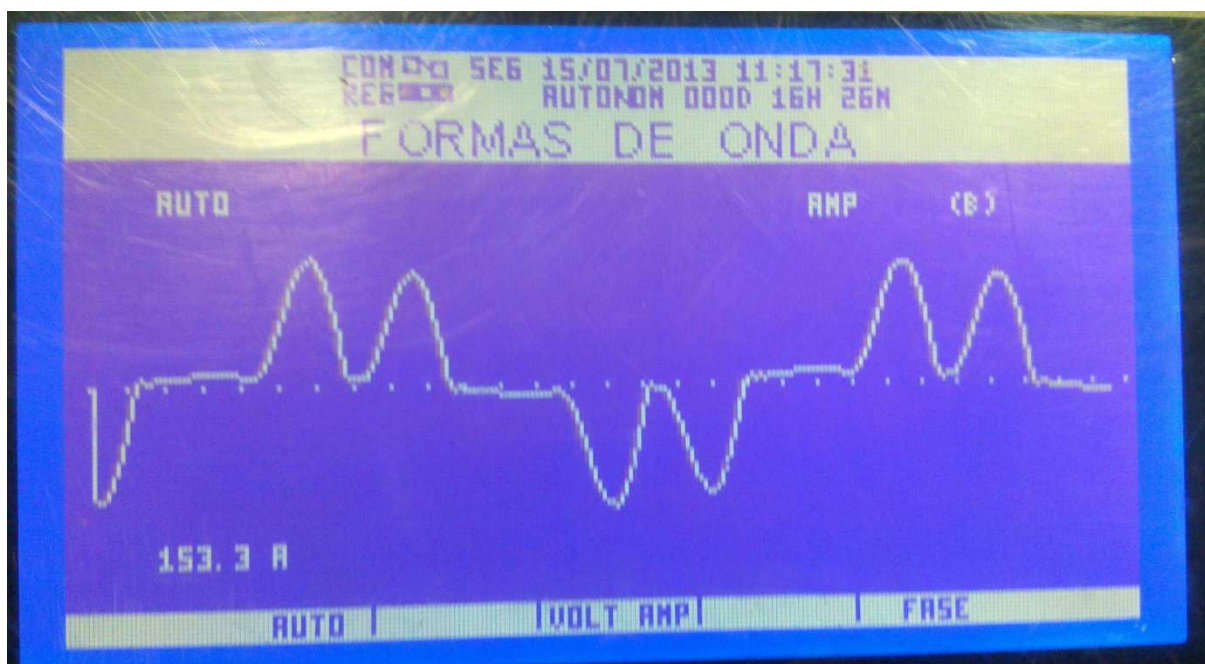


Figura 52 – Forma de Onda de Corrente – Fase B

Fonte: Foto do Autor (2013).



Figura 53 – Forma de Onda de Corrente – Fase C

Fonte: Foto do Autor (2013).

5.3.6.2. Espectro de Frequência de Corrente

Uma vez confirmada a presença de elevadas distorções harmônicas de corrente se faz necessário conhecer qual a ordem e qual a amplitude das componentes harmônicas. Assim, o espectro de frequência permite avaliar de forma mais detalhada as distorções harmônicas de corrente. Os resultados apresentados demonstram o percentual que o valor eficaz de cada ordem harmônica representa perante o valor eficaz da componente fundamental.

Os gráficos das Figura 54, Figura 55 e Figura 56 representam o espectro harmônico de corrente das fases A, B e C respectivamente. Foram considerados os valores máximos obtidos de cada ordem harmônica. A Tabela 10 compara os valores medidos com as recomendações da norma do IEC 61000-3-4. A norma apresentada anteriormente do IEEE 519 não pode ser usada para esta comparação, pois ela se refere à distorção da demanda total e não à distorção harmônica em relação a componente fundamental.

Tanto o espectro de frequência quanto os valores apresentados na Tabela 10 foram definidos em função dos valores máximos medidos em cada uma das fases, considerando os três estágios de aquecimento.

Assim, como indica a literatura na área, observa-se uma elevada componente harmônica da ordem de $6n \pm 1$, ou seja, de quinta, sétima, décima primeira, décima terceira ordem, uma vez que o forno possui um retificador trifásico.

As harmônicas da ordem de $3n$, ou seja, terceira, nona, décima quinta, apresentam uma distorção harmônica reduzida, uma vez que o forno é alimentado de forma trifásica sem condutor de neutro. Assim, mesmo existindo harmônicas reduzidas de ordem $3n$, elas não são de sequencia zero, uma vez que não existe condutor de neutro para elas circularem.

Comparando os resultados obtidos na medição com a norma do IEC observa-se que a maioria dos componentes de ordem $6n \pm 1$ encontra-se acima dos valores recomendados por ambas as normas. Os harmônicos de ordem $3n$ possuem seus valores próximos aos recomendados.

Verifica-se assim que o forno de aquecimento a indução estudado, assim como outros fornos de aquecimento indutivo com topologia de construção semelhante (retificador trifásico de seis pulsos associado com um inversor de frequência de ponte completa), possuem elevadas distorções harmônicas de corrente, sobretudo nas harmônicas de ordem $6n \pm 1$.

Tabela 10 – Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente com as Normas

Ordem da Harmônica	Medição			Norma de Análise
	Fase A	Fase B	Fase C	IEC 61000-3-4
3°	6,89%	4,06%	9,38%	21,6%
5°	58,49%	61,55%	62,91%	10,7%
7°	41,19%	43,23%	44,62%	7,2%
9°	2,44%	5,16%	3,20%	3,8%
11°	16,23%	6,90%	21,05%	3,1%
13°	10,47%	12,04%	11,67%	2%
15°	0,87%	0,65%	1,60%	0,7%
17°	3,84%	4,30%	5,72%	1,2%
19°	4,19%	4,52%	3,89%	1,1%
21°	0,70%	0,65%	0,67%	0,6%
23°	2,27%	2,80%	2,52%	0,9%
25°	1,35%	2,58%	1,29%	0,8%
27°	0,41%	0,43%	0,41%	0,6%
29°	1,15%	1,51%	1,56%	0,7%
31°	1,10%	1,72%	0,97%	0,7%
33°	0,00%	0,43%	0,23%	0,6%
35°	0,75%	0,95%	0,96%	
37°	0,85%	0,89%	0,78%	
39°	0,00%	0,00%	0,00%	
41°	0,54%	0,62%	0,65%	
43°	0,69%	0,62%	0,62%	
45°	0,00%	0,00%	0,00%	
47°	0,42%	0,53%	0,53%	
49°	0,50%	0,42%	0,47%	

Fonte: Tabela do Autor (2013).

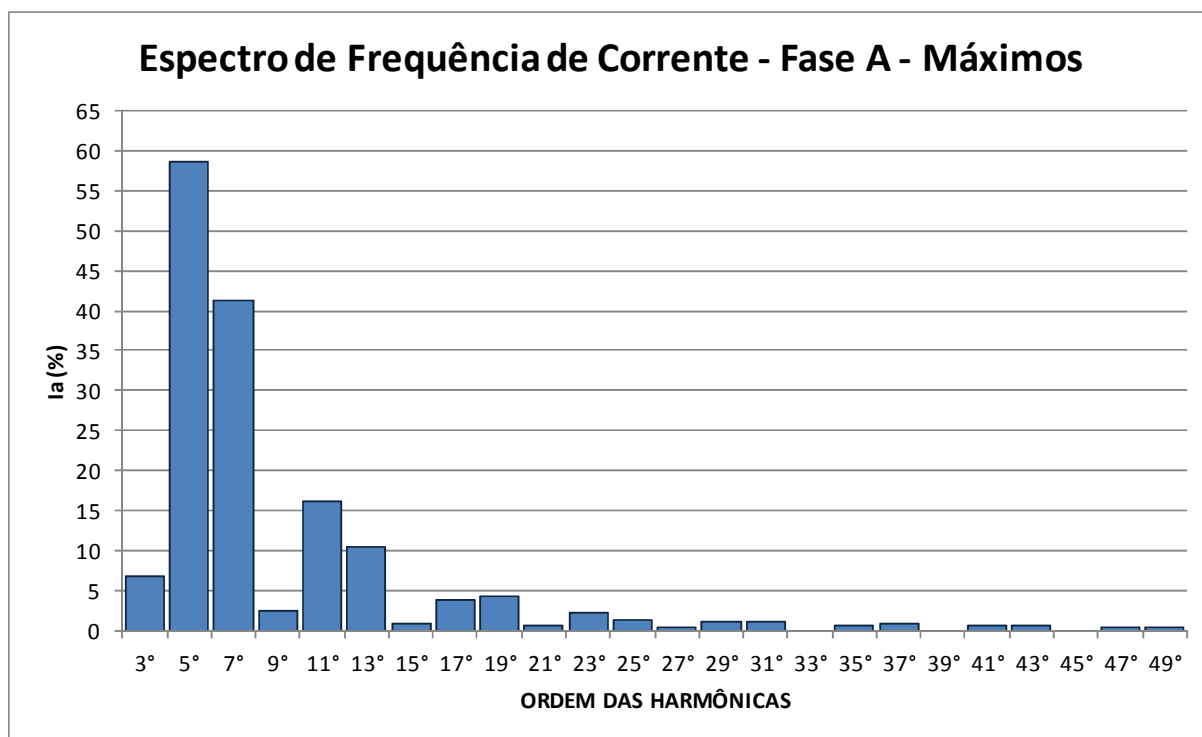


Figura 54 – Espectro de Frequência de Corrente – Fase A – Valores Máximos

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

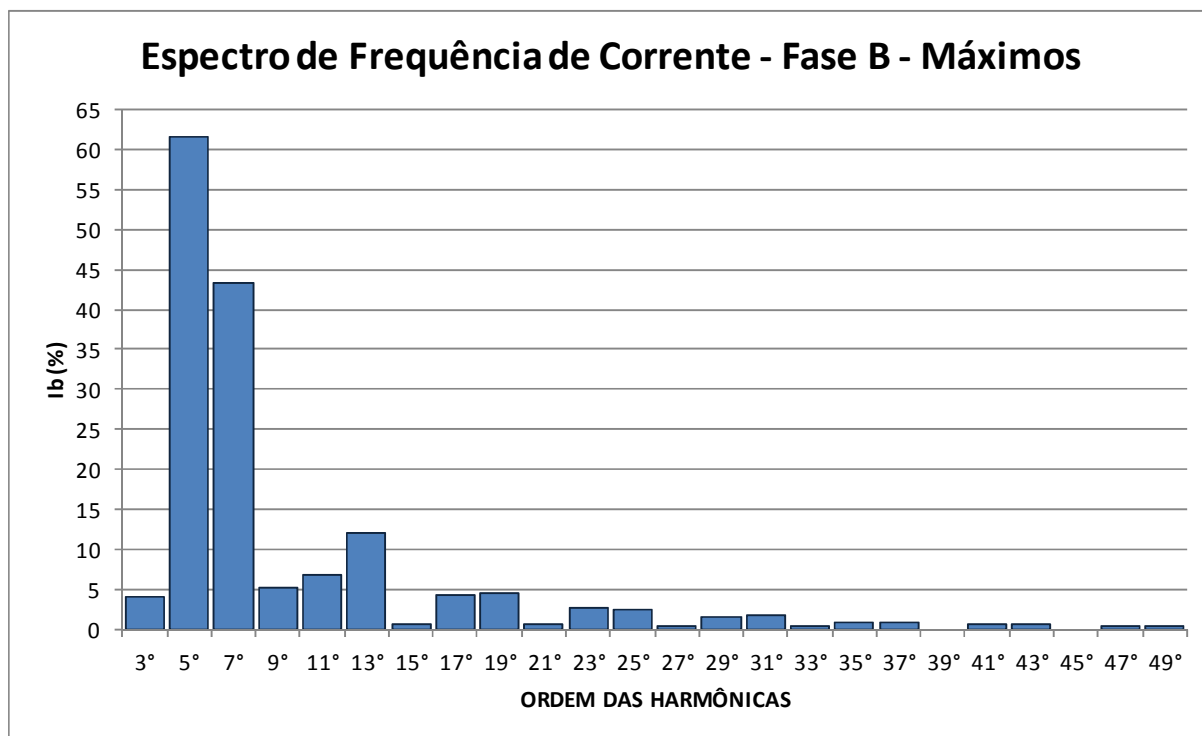


Figura 55 – Espectro de Frequência de Corrente – Fase B – Valores Máximos

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

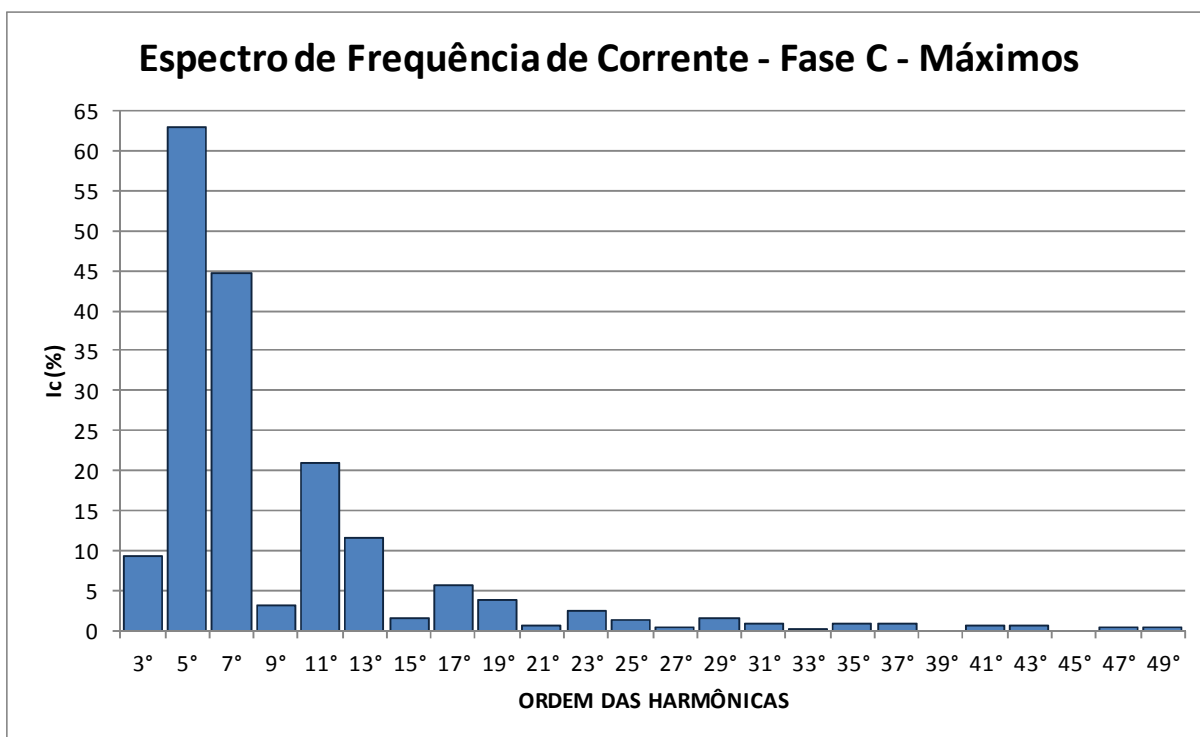


Figura 56 – Espectro de Frequência de Corrente – Fase C – Valores Máximos

Fonte: Gráfico do Autor (2013).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como escopo caracterizar os problemas relativos à qualidade de energia elétrica causados por um forno de aquecimento indutivo. Para isso, fez-se inicialmente uma pesquisa bibliográfica a respeito de fornos de aquecimento indutivo e parâmetros de qualidade de energia elétrica. A partir da fundamentação teórica, partiu-se para a etapa de medições, inspeções visuais e análise de resultados.

A etapa de medições consistiu no registro das grandezas elétricas por um Analisador de Energia durante o funcionamento do forno a indução. Através de inspeções visuais durante o funcionamento do forno foi possível observar na prática algumas de suas vantagens em relação aos fornos convencionais mencionadas pelos autores da área, como a rápida velocidade de aquecimento, ausência aparente de emissão de gases e o fato de calor ficar restrito apenas nas proximidades da bobina, não se dissipando pelo ambiente. A etapa de análise dos resultados consistiu na interpretação dos dados medidos e na comparação destas grandezas com os parâmetros especificados em recomendações técnicas.

Os fornos de aquecimento indutivo realmente apresentam inúmeros benefícios em relação aos fornos de aquecimento convencionais. Dentre os benefícios já citados durante o desenvolvimento teórico do trabalho, pôde-se verificar durante o trabalho em campo o alto grau de aquecimento do forno (aquecendo um tarugo metálico de 6 cm de diâmetro em 1 minuto), o baixo ruído de operação, não houve emissão visível de gases e constatou-se que o calor proveniente do aquecimento fica restrito à proximidade da bobina, não propagando-se pelo o ambiente.

Em relação à qualidade de energia elétrica constatou-se não haver efeitos prejudiciais do forno em relação aos níveis de tensão, desequilíbrio de tensão, picos de corrente e desequilíbrio de carga entre as fases. Observou-se que os problemas gerados pelo forno a indução ficam restritos ao campo das distorções harmônicas.

Analisando-se separadamente as distorções harmônicas de tensão e corrente, verificou-se através da comparação dos valores medidos com as

recomendações técnicas que as distorções harmônicas de tensão se encontram, em sua maioria, dentro dos limites consideráveis aceitáveis. Assim as distorções harmônicas de tensão não são o fator crítico no que se diz respeito ao problema de qualidade de energia elétrica em fornos a indução.

As distorções harmônicas de corrente por sua vez, quando comparadas com as recomendações técnicas do IEC, apresentam valores nas harmônicas de ordem $6n \pm 1$ consideravelmente superiores aos limites previstos. A observação da forma de onda de corrente permite constatar que o formato de onda se apresenta tão deformado que deixou de ter um aspecto de senoide.

Assim, pode-se concluir que os problemas relativos a qualidade de energia elétrica do forno de aquecimento a indução estudado está restrito as distorções harmônicas de corrente de ordem $6n \pm 1$.

Para dar continuidade a este estudo, sugere-se como trabalhos futuros a serem desenvolvidos a simulação desta topologia de forno indutivo através de softwares de análise de circuitos e sua comparação com os resultados medidos, simulação de um filtro harmônico e posterior desenvolvimento prático deste filtro harmônico.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo, 2000.

ALVES, Mário Fabiano. **QEE – Qualidade da Energia Elétrica**. Minas Gerais, 2010.

ALBADÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8**. 2010.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução N°414, de 9 de Setembro de 2010**. 2010.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R.; CHEN, S. **Power System Quality Assessment**. Nova Iorque, 2000.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 5ª Edição, Florianópolis, 2005.

CALLEGARO, A. D.; RHEINHEIMER, C.; KOTLINSKI, E.; JAPPE, T. K. **Influência de Inversores de Frequência na Qualidade de Energia Elétrica**. 2006.

CHAPMAN, David. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**. São Paulo, 2002.

DE KEULENAER, Hans. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**, São Paulo, 2002.

DE LA ROSA F. C. **Harmonic and Power Systems**. Nova Iorque, 2006.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **O Efeito da Cintilação Luminosa: Causas, Efeitos e Soluções**. 2010.

EN – 50160-2000. **Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution systems**. Comitê Europeu de Normatização - CEN. 2000.

EPRI (Electric Power Research Institute). **Power Quality for Induction Melting in Metals Production**. EUA. 1999. Disponível em: <http://www.energy.ca.gov/process/pubs/pq_inductn_melting_tc114625.pdf>. Acesso em 01 fevereiro 2013.

GANDHEWAR, Vivek R.; BANSOD, Satish V.; BORADE, Atul B. **Induction Furnace – A Review**. International Journal of Engineering and Technology, India. 2011. Disponível em: <<http://www.enggjournals.com/ijet/docs/IJET11-03-04-06.pdf>>. Acesso em 01 fevereiro 2013.

GEORGE, S.; AGARWAL, V. **Optimum Control of Seletive and Total Harmonic Distortion in Current and Voltage Under Nonsinusoidal Conditions**. 2008.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física III**. 8. ed. Rio de Janeiro, 2009.

HANZELKA, Zbigniew; BIEN, Andrzej. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**. São Paulo, 2004.

IAGAR, Angela. **Power Quality Problems Generated by Line Frequency Coreless Induction Furnaces**. Politechnica University Timisoara, Romania 2011.

IEC - 61000. **Electromagnetic Compatibility**. International Electrotechnical Commission - IEC. 2002.

IEEE 1159-1995. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Eletric Power Quality**. 1995.

IEEE 519-1992. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 1992.

JAMO Aquecimento Indutivo. **Cátalogo de produtos**. 2010. Disponível em: <<http://www.jamo.ind.br/produtos-catalogo/catalogo2.pdf>>. Acesso em: 24 de Julho de 2012.

L. M. MEHL, Ewaldo. **Qualidade da Energia Elétrica**. 2005. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>>. Acesso em: 23 de abril de 2012.

MAMEDE, João. **Instalações Elétricas Industriais**, Rio de Janeiro, 1995.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009.

MEHL, Ewaldo L. M. **Qualidade de Energia Elétrica**. Curitiba, 2005.

NADOT, Vladimir V. **United States Patent Application Publication**. US 2003/0035309 A1. Voorhees, 2003.

NBR5410/04. **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2004.

O SETOR ELÉTRICO, São Paulo: **Atitude**. Editorial, Set. 2012. Edição 80.

PIRES, Igor Amariz. **Harmônicos Provocados por Eletrônicos**. Artigo publicado na Revista O Setor Elétrico, janeiro, 2010.

PROCOBRE, Instituto Brasileiro de Cobre. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**. São Paulo, 2001.

RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R.; BLACK, M. **Handbook of Induction Heating**. Nova Iorque, 2002.

SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark Waldo; YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III**. 12. ed. São Paulo, 2009.

STAROSTA, José. **Flutuação de Tensão (flicker)**. Repostagem publicada na revista O Setor Elétrico, edição 72, janeiro de 2012.

ZAMORA, I.; ALBIZU, I.; MAZON, A.J.; SAGASTABEITIA, K.J.; FERNANDEZ, E. **Harmonic Distortion in a Steel Plant With Induction Furnaces**. Department of

Electrical Engineering, University of Basque Country, Espanha. 2005. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/pdfs/ZAMORA401.pdf>>. Acesso em 01 fevereiro 2013.

ZINN, S.; SEMIATIN, S. L. **Elements of Induction Heating**. ASM International. 1988.

ANEXO A

Tensões nominais padronizadas e recomendadas para ligações trifásicas até 1 kV

Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts			
Trifásica	(220) / (127)	(201 ≤ TL ≤ 231) / (116 ≤ TL ≤ 133)	(116 < TL ≤ 133) ou (189 ≤ TL < 201) / (109 ≤ TL < 116) ou (133 < TL ≤ 140)	(TL < 189 ou TL > 233) / (TL < 109 ou TL > 140)
	(380) / (220)	(348 ≤ TL ≤ 396) / (201 ≤ TL ≤ 231)	(327 ≤ TL < 348) ou (396 < TL ≤ 403) / (189 ≤ TL < 201) ou (231 < TL ≤ 233)	(TL < 327 ou TL > 403) / (TL < 189 ou TL > 233)

Fonte: PRODIST – Módulo 8 (2010).

ANEXO B

Parâmetros de tensão segundo a EN 50160 – Tensões até 1kV

Parâmetro	Característica da tensão de entrada
Variação da tensão	±10% durante 95% da semana Média dos valores RMS medidos em intervalos de 10 minutos
Variações bruscas de tensão	5% normal 10% infrequente Plt ≤ 1 para 95% da semana
Afundamentos de tensão	A maioria: duração < 1s ; queda < 60% Limite de quedas locais causadas por conexão de cargas: 10 a 50%
Interrupção de curta duração	Até 3 minutos Poucas dezenas/centenas de interrupções ao ano 70% das interrupções < 1s
Interrupção de longa duração	Maior do que 3 minutos < 10-50 eventos ao ano
Surto de tensão transitório	Geralmente < 6kV ; ocasionalmente maior Tempo de subida: ms — μs

Fonte: EN 50160 (Adaptado).

ANEXO C

Parâmetros de tensão segundo a norma IEC 61000 – Tensões até 1kV

Parâmetro	Característica da tensão de entrada	
Varição da tensão	±10% durante 15 minutos	
Variações bruscas de tensão	IEC 61000-2-2 3% Normal 8% Infrequente Pst > 1,0 e Plt < 0,8	IEC 61000-6-2 3% normal 4% máximo Pst < 1,0 e Plt < 0,65
Afundamentos de tensão	Redução de 70% da nominal durante 10ms Redução de 40% da nominal durante 100ms	
Interrupção de curta duração	Redução de 95% durante 5 segundos	
Surto de tensão transitório	± 2kV, fase-terra ± 1kV, fase-fase	

Fonte: IEC série 61000 (Adaptado).

ANEXO D

Valores de referência para distorções harmônicas totais de tensão

Tensão nominal do barramento (Vn)	Distorção Harmônica Total de Tensão
$Vn \leq 1kV$	10%
$1kV < Vn \leq 13,8kV$	8%
$13,8kV < Vn \leq 69kV$	6%
$69kV < Vn < 230kV$	3%

Fonte: PRODIST – Módulo 8 (2010).

Valores de referência para distorções harmônicas individuais de tensão

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica de tensão - tensão nominal do barramento (Vn)				
	$Vn \leq 1kV$	$1kV < Vn \leq 13,8kV$	$13,8kV < Vn \leq 69kV$	$69kV < Vn < 230kV$	
Ímpares não múltiplas 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%
	17	2,5%	2%	1,5%	1%
	19	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: PRODIST – Módulo 8 (2010).

ANEXO E

Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição – IEEE 519

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga							
I _{cc} – Corrente de curto-circuito; I ₀ - Corrente demandada							
Níveis de tensão	$\frac{I_{cc}}{I_0}$	< 11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	35 < n	TDD
120V a 69kV	< 20	4%	2%	1,5%	0,6%	0,3%	5%
	20 < 50	7%	3,5%	2,5%	1%	0,5%	8%
	50 < 100	10%	4,5%	4%	1,5%	0,7%	12%
	100 < 1000	12%	5,5%	5%	2%	1%	15%
	> 1000	15%	7%	6%	2,5%	1,4%	20%
69kV a 161kV	< 20	2%	1%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
	20 < 50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4%
	50 < 100	5%	2,25%	2%	0,75%	0,35%	6%
	100 < 1000	6%	2,75%	2,5%	1%	0,5%	7,5%
	> 1000	7,5%	3,5%	3%	1,25%	0,7%	10%
>161kV	< 50	2%	1%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
	≥ 50	3%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%	3,75%

Fonte: IEEE-519 (1992).

Limites de distorção da tensão para sistemas de distribuição – IEEE 519

Nível de tensão (Vn)	Distorção individual	DHTt
Vn ≤ 69kV	3%	5%
69kV < Vn ≤ 161kV	1,5%	2,5%
Vn > 161kV	1%	1,5%

Fonte: IEEE-519 (1992).

ANEXO F

Limites de distorção da tensão para sistemas de distribuição – EN 50160

Harmônicos ímpares				Harmônicos Pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem	% da tensão nominal	Ordem	% da tensão nominal	Ordem	% da tensão nominal
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6 até 24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

DHTt < 8%

Fonte: EN 50160.

ANEXO G

Limites de distorção da tensão para sistemas de distribuição – IEC 61000-2-2

Harmônicos ímpares				Harmônicos Pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem (n)	% da tensão nominal	Ordem (n)	% da tensão nominal	Ordem (n)	% da tensão nominal
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,3%	6	0,5%
13	3%	21	0,2%	8	0,5%
17	2%	>21	0,2%	10	0,5%
19	1,5%			12	0,2%
23	1,5%			>12	0,2%
25	1,5%				
>25	$0,2+0,5 \times 25/n$				

Fonte: IEC 61000-2-2.

ANEXO H

Limites individuais de distorção da corrente– IEC 61000-3-4

Componente Harmônico	Harmônico Admissível	Componente Harmônico	Harmônico Admissível
3	21,6%	21	0,6%
5	10,7%	23	0,9%
7	7,2%	25	0,8%
9	3,8%	27	0,6%
11	3,1%	29	0,7%
13	2%	31	0,7%
15	0,7%	≤33	≤0,6%
17	1,2%		
19	1,1%		

Fonte: IEC 61000-3-4 (1998).