

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ACRÉSCIMO DE
PERDAS ELÉTRICAS DEVIDO À CIRCULAÇÃO DE
CORRENTES DISTORCIDAS**

MARCEL FERNANDO DA COSTA PARENTONI

Itajubá, Agosto de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ACRÉSCIMO DE PERDAS ELÉTRICAS DEVIDO À CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DISTORCIDAS

MARCEL FERNANDO DA COSTA PARENTONI

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

ORIENTADOR: Dr. JOSÉ POLICARPO GONÇALVES de ABREU

Itajubá, Agosto de 2010

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

P228a

Parentoni, Marcel Fernando da Costa

Análise experimental do acréscimo de perdas elétricas devido
à circulação de correntes distorcidas / Marcel Fernando da Costa
Parentoni. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2010.

144 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Perdas elétricas. 2. Medição de temperatura. 3. Cargas não
lineares. I. Abreu, José Policarpo Gonçalves de, orient. II. Uni_
sidade Federal de Itajubá. III. Título.

RESUMO

O principal objetivo desta tese de doutorado é obter uma metodologia de dimensionamento de transformadores quando da alimentação de cargas não lineares. O desenvolvimento de tal procedimento é baseado na medição do aquecimento no transformador provocado por diversas condições de distorção da carga. Complementarmente essa metodologia tem seus resultados comparados com os dos procedimentos convencionais de dimensionamento de transformadores.

Para alcançar tal objetivo foi necessária a realização de uma série de procedimentos e medições laboratoriais, envolvendo dois sistemas de medição de topologias diferentes. Entre os procedimentos contidos nesta tese, destacam-se os seguintes;

- Obtenção prática do comportamento da resistência em função da frequência;
- Análise do acréscimo de perdas em resistores e transformadores devido à circulação de correntes distorcidas;
- Avaliação da validade da superposição proveniente da aplicação das séries de Fourier;

Espera-se que o presente trabalho auxilie nos procedimentos de dimensionamento de equipamentos elétricos, para que as chances de sub ou sobredimensionamento sejam minimizadas.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to obtain a methodology for transformers design when feeding nonlinear loads. The development of such procedure is based on measurement of transformer heating caused by several conditions of load distortion. In addition this methodology has its results compared with those obtained by conventional procedures for transformers design.

To reach this purpose it was necessary to realize a series of procedures and lab measurements, involving measurement systems of two different topologies. Among the procedures contained in this thesis, it is highlighted the following;

- Achievement of a practical behavior of resistance versus frequency;
- Analysis of the increase of the losses in resistors and transformers due to the flow of distorted electrical currents;
- Validation of the superposition from the application of Fourier series.

It is hoped that this work assists in electrical equipment design proceedings, so that the chances of under or overdimensioning are minimized.

SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
SUMÁRIO.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	x
1 <i>Introdução</i>	1
1.1 Considerações Iniciais.....	2
1.2 Relevância do Tema.....	2
1.3 Objetivos e Contribuições Esperadas.....	3
1.4 Questionamentos Acerca do Tema.....	4
1.5 Estrutura da Tese.....	5
2 <i>Análise Teórica</i>	7
2.1 Considerações Iniciais.....	8
2.2 Influência do Efeito Pelicular nas Perdas em Equipamentos Elétricos.....	8
2.3 Acréscimo de Perdas em Equipamentos Elétricos submetidos a Condições Não-Senoidais.....	17
2.3.1 Condutores Elétricos.....	17
2.3.2 Transformadores.....	26
2.3.2.1 Cálculo Convencional de Perdas.....	26
2.3.2.2 Efeitos das Distorções nas Perdas de Transformadores.....	27
2.4 Caso Exemplo.....	33
2.5 Considerações Finais.....	35
3 <i>Concepção dos Sistemas de Medição</i>	36
3.1 Considerações Iniciais.....	37
3.2 Sugestões da Literatura.....	37
3.3 Sistema de Medição 1.....	38
3.4 Sistema de Medição 2.....	44
3.5 Considerações Finais.....	50
4 <i>Simulações Computacionais</i>	51
4.1 Considerações Iniciais.....	52
4.2 Comparação entre Formas de Cálculo de Energia Dissipada.....	52
4.3 Simulação de Sistemas Comparativos aos de Medição.....	56
4.3.1 Sistema de Simulação 1 - Dissipação de Energia em Resistor.....	56
4.3.2 Sistema de Simulação 2 - Dissipação em Transformador.....	60
4.4 Análise Comparativa.....	64
4.5 Considerações Finais.....	65
5 <i>Medições e Análise dos Resultados do Sistema 1</i>	66
5.1 Considerações Iniciais.....	67
5.2 Definição das Situações a Serem Medidas.....	67
5.2.1 Conjunto de Testes 1: Correntes Senoidais de Variadas Frequências.....	67
5.2.2 Conjunto de Testes 2: Onda Distorcida <i>versus</i> Somatório de Senóides.....	68
5.2.3 Conjunto de Testes 3: Ensaio com o Banco de Resistores.....	70
5.3 Resultados das Medições e Análises.....	71
5.3.1 Resultados das Medições do Conjunto de Testes 1.....	71
5.3.1.1 Situações 1 a 7 Ensaçadas com o Fluido Ar.....	71
5.3.1.2 Situações 1 e 12 Ensaçadas com o Fluido Ar.....	75
5.3.1.3 Situações 1 e 12 Ensaçadas com o Fluido Água.....	76

5.3.2	Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 1	78
5.3.2.1	Acréscimo das Perdas (A_p)	78
5.3.2.2	Comportamento da Resistência em função da Frequência com o Ensaio Realizado com o Fluido Ar	79
5.3.2.3	Comportamento da Resistência em função da Frequência com o Ensaio Realizado com o Fluido Água	83
5.3.3	Resultados das Medições do Conjunto de Testes 2	86
5.3.4	Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 2	89
5.3.5	Resultados das Medições do Conjunto de Testes 3	90
5.3.6	Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 3	92
5.4	Comentários Adicionais sobre as Medições com o Sistema 1	96
5.5	Considerações Finais	98
6	<i>Medições e Análise dos Resultados do Sistema 2</i>	99
6.1	Considerações Iniciais	100
6.2	Definição das Situações a Serem Medidas	100
6.2.1	Conjunto de Testes 1: Ensaio com Motor de Indução e Inversor	100
6.2.2	Conjunto de Testes 2: Aplicação de Correntes de Variadas Distorções	101
6.3	Resultados das Medições e Análises	102
6.3.1	Resultados das Medições do Conjunto de Testes 1	102
6.3.1.1	Situação 1: MIT + Freio com Carga máxima	102
6.3.1.2	Situação 2: Inversor + MIT + Freio com Carga máxima	105
6.3.1.3	Situação 3 – MIT + Freio – Carga Menor que a Máxima	107
6.3.2	Análises dos Resultados no Conjunto de Testes 1	112
6.3.3	Resultados das Medições do Conjunto de Testes 2	113
6.3.4	Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 2	119
6.4	Considerações Finais	124
7	<i>Proposta para o Dimensionamento de Transformadores</i>	125
7.1	Considerações Iniciais	126
7.2	Proposta para o Sobredimensionamento de Transformadores	126
7.3	Aplicação da Proposta de Dimensionamento nos Resultados das Medições	129
7.4	Comparativo entre as Propostas de Dimensionamento Teórico e Prático	131
7.5	Obtenção Analítica da Influência do Efeito Pelicular no Aquecimento do Transformador	133
7.6	Considerações Finais	134
8	<i>Conclusões</i>	135
8.1	Considerações Iniciais	136
8.2	Resultados Alcançados	136
8.3	Comparação com a Expectativa	139
8.4	Sugestões para Trabalhos Futuros	140
	<i>Referências Bibliográficas</i>	142

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Comparação de defasagem de 5º harmônico.....	5
Figura 2.1 – Distribuição de temperatura no condutor. (Zunec, 2006)	10
Figura 2.2 – Temperatura em função da distância ao centro do condutor.....	11
Figura 2.3 – Corrente em função da distância ao centro do condutor.	11
Figura 2.4 – Modelo desenvolvido por Kim (1996).	12
Figura 2.5 – Impedância total calculada para o cabo coaxial.	13
Figura 2.6 – Resistência efetiva do cobre a 20 °C.	14
Figura 2.7 – Comportamento da resistência de condutores cilíndricos tubulares.	14
Figura 2.8 – Comportamento da resistência de condutores cilíndricos quadrados.....	16
Figura 2.9 – Distribuição da densidade de corrente em relação à seção transversal.	16
Figura 2.10 – Relação entre impulso de corrente e seção do condutor.	17
Figura 2.11 – Efeito do tipo de material. (Maksiejewski, 1990)	18
Figura 2.12 – Temperatura da superfície do condutor.....	19
Figura 2.13 – Temperatura do condutor. (Anders, 2004)	23
Figura 2.14 – Perdas totais. (Anders, 2004)	23
Figura 2.15 – Fator de perda. (Anders, 2004).....	24
Figura 2.16 – Expectativa de vida versus THD de tensão. (Pacheco, 2000).....	25
Figura 2.17 – Expectativa de vida versus THD de corrente. (Pacheco, 2000).....	25
Figura 2.18 – Divisão das Perdas do Transformador.....	26
Figura 2.19 – Comportamento das Perdas por Correntes Parasitas nos Enrolamentos.	31
Figura 2.20 – Comportamento das Perdas por Fluxo de Dispersão nos Outros Componentes.	31
Figura 2.21 – Comportamento da Máxima Corrente do Transformador.....	31
Figura 2.22 – Transformador sob análise.	34
Figura 3.1 – Diagrama Esquemático do Sistema 1.....	38
Figura 3.2 – Fontes Pacific e California.	39
Figura 3.3 – Caixa Omicron.	40
Figura 3.4 – Medidor MARH21 da RMS.....	40
Figura 3.5 – Medidor PM300 da Voltech.	41
Figura 3.6 – Resistor de Ni-Cr.....	42
Figura 3.7 – Calorímetro utilizado.....	42
Figura 3.8 – Transmissor de temperatura.	43
Figura 3.9 – Carga.	43
Figura 3.10 – Sistema completo.	44
Figura 3.11 – Diagrama elétrico do sistema 2.	44
Figura 3.12 – Diagrama elétrico montado.	45
Figura 3.13 – Varivolt.....	45
Figura 3.14 – Transformador.....	46
Figura 3.15 – Inversor de frequência.	46
Figura 3.16 – MIT.....	47
Figura 3.17 – Freio de Foucault acoplado ao eixo do MIT.	47
Figura 3.18 – Conjunto de carga.....	48
Figura 3.19 – Inserção do termopar.	49
Figura 3.20 – Medidores no sistema 2.....	49
Figura 3.21 – Sistema 2 montado.	50
Figura 4.1 – Corrente e potência instantâneas.	53
Figura 4.2 – Divisão do sinal de corrente.	54
Figura 4.3 – Decomposição do sinal de corrente em série de Fourier.....	55

Figura 4.4 – Sistema de simulação 1 – carga linear.....	56
Figura 4.5 – Tensão e corrente para a situação linear.....	57
Figura 4.6 – Potência para a situação linear.....	57
Figura 4.7 – Sistema de simulação 1 – carga não linear.....	58
Figura 4.8 – Tensão e corrente para a situação não linear.....	59
Figura 4.9 – Potência para a situação não linear.....	59
Figura 4.10 – Sistema de simulação 2 – carga linear.....	61
Figura 4.11 – Tensão e corrente para a situação linear.....	61
Figura 4.12 – Potência para a situação linear.....	62
Figura 4.13 – Sistema de simulação 2 – carga não linear.....	62
Figura 4.14 – Tensão e corrente para a situação não linear.....	63
Figura 4.15 – Potência para a situação não linear.....	63
Figura 5.1 – Forma de onda da corrente distorcida composta pela fonte.....	69
Figura 5.2 – Banco de resistores.....	70
Figura 5.3 – Aquecimento registrado para as situações 1, 2 e 7.....	72
Figura 5.4 – Curvas de aquecimento durante 30 minutos.....	73
Figura 5.5 – Vista em <i>zoom</i> das curvas de aquecimento mostradas na Figura 5.4.....	74
Figura 5.6 – Comportamento do aquecimento.....	75
Figura 5.7 – Aquecimento para 60 e 5000 Hz.....	76
Figura 5.8 – Curvas de aquecimento com a água como fluido.....	77
Figura 5.9 – Regressão logarítmica.....	77
Figura 5.10 – Resistência versus frequência.....	80
Figura 5.11 – Curva de tendência.....	81
Figura 5.12 – Impedância do cabo de cobre versus frequência.....	82
Figura 5.13 – Comportamento da impedância em função da frequência.....	83
Figura 5.14 – Regressão logarítmica.....	83
Figura 5.15 – Impedância do conjunto cabo de cobre + resistor de níquel cromo.....	84
Figura 5.16 – Impedância do cabo de cobre.....	85
Figura 5.17 – Curvas de aquecimento das situações ensaiadas.....	86
Figura 5.18 – Curvas de aquecimento provocadas pelas correntes distorcida e senoidal de 60 Hz.....	87
Figura 5.19 – Curvas de aquecimento provocadas pelas correntes senoidais de 300, 420, 660 e 780 Hz.....	87
Figura 5.20 – Regressão linear – Distorcida e 60 Hz.....	88
Figura 5.21 – Regressão linear – 300, 420, 660 e 780 Hz.....	89
Figura 5.22 – Curvas de aquecimento do banco resistivo para 60 Hz e 780 Hz.....	91
Figura 5.23 – Curvas de aquecimento para correntes senoidal e distorcida ambas de mesmo valor eficaz.....	91
Figura 5.24 – Curvas de aquecimento para fundamental e distorcida de valores eficazes diferentes.....	92
Figura 5.25 – Divisão das perdas entre distorção da forma de onda e acréscimo de valor eficaz.....	95
Figura 6.1 – Curvas de tendência de tensão e corrente.....	103
Figura 6.2 – Formas de onda de tensão e corrente no secundário.....	103
Figura 6.3 – Formas de onda de tensão e corrente no primário.....	104
Figura 6.4 – Curva de aquecimento do transformador.....	104
Figura 6.5 – Curvas de tendência de tensão e corrente.....	105
Figura 6.6 – Formas de onda de tensão e corrente no secundário.....	106
Figura 6.7 – Formas de onda de tensão e corrente no primário.....	106
Figura 6.8 – Curva de aquecimento do transformador.....	107
Figura 6.9 – Curvas de tendência de tensão e corrente.....	108

Figura 6.10 – Formas de onda de tensão e corrente no secundário.	108
Figura 6.11 – Formas de onda de tensão e corrente no primário.	109
Figura 6.12 – Curva de aquecimento do transformador.	109
Figura 6.13 – Curvas de aquecimento - Situação 3 (linear) <i>versus</i> Situação 2 (não linear)	110
Figura 6.14 – Regressão linear.	111
Figura 6.15 – Regressão polinomial.	111
Figura 6.16 – Formas de onda da tensão aplicada pela fonte.	114
Figura 6.17 – Espectro harmônico de amplitude de tensão para as três situações.	115
Figura 6.18 - Espectro harmônico de amplitude de tensão para as situações 1, 4 e 5.	115
Figura 6.19 - Espectro harmônico de amplitude de tensão para as situações 1, 6 e 7.	116
Figura 6.20 - Espectro harmônico de amplitude de tensão para as situações 1, 8 e 9.	116
Figura 6.21 – Curva de aquecimento registrada na situação base.	117
Figura 6.22 – Curva de aquecimento registrada na situação 2.	117
Figura 6.23 – Curva de aquecimento registrada na situação 3.	118
Figura 6.24 – Curvas de aquecimento traçadas a partir da regressão linear.	118
Figura 6.25 – Distorção harmônica <i>versus</i> acréscimo de perdas em relação à situação senoidal.	120
Figura 6.26– Distorção harmônica <i>versus</i> acréscimo de perdas em relação à situação base.	120
Figura 6.27 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 2 e 3.	122
Figura 6.28 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 4 e 5.	123
Figura 6.29 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 6 e 7.	123
Figura 6.30 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 8 e 9.	124

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Comparação dos valores calculados e medidos.	9
Tabela 2.2 – Resistências e perdas ôhmicas para a fase A.	21
Tabela 2.3 – Resistências e perdas ôhmicas para o condutor neutro.	21
Tabela 2.4 – Resultados da Medição do Transformador de 2 [kVA].....	32
Tabela 2.5 – Composição harmônica da corrente de carga medida em laboratório.	34
Tabela 3.1 – Especificações técnicas das fontes de tensão utilizadas.	39
Tabela 3.2 – Características técnicas dos medidores MARH21 e PM3000.	41
Tabela 5.1 – Situações de medição para o sistema 1.	67
Tabela 5.2 – Segundo conjunto de testes para o sistema 1.	69
Tabela 5.3 – Composição harmônica do sinal distorcido.	92
Tabela 6.1 – Situações de ensaio para o sistema 2.	100
Tabela 6.2 – Detalhamento das situações a serem ensaiadas.	101
Tabela 6.3 – Coeficientes angulares e acréscimo de perdas para todas as situações.....	119
Tabela 6.4 – Divisão das perdas entre distorção da forma de onda e acréscimo de valor eficaz.	122
Tabela 7.1 – Valores típicos de potência aparente e perdas de transformadores.....	129
Tabela 7.2 – Dimensionamento do transformador para as nove situações ensaiadas.....	130
Tabela 7.3 – Comparativo para o conjunto de testes 1.	131
Tabela 7.4 – Comparativo para o conjunto de testes 2.	131

Capítulo 1

Introdução

*“Também não achei melhor título para
minha narração; se não tiver outro
daqui até o fim do livro, vai este
mesmo.”*

Machado de Assis

1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os principais objetivos da tese de doutorado, bem como descreve a estrutura utilizada ao longo do texto.

1.2 Relevância do Tema

Cargas não lineares provocam a circulação de correntes de comportamento não senoidal em equipamentos elétricos instalados entre a rede de suprimento de energia elétrica e as próprias cargas (transformadores, cabos, reatores limitadores, equipamentos de manobra, etc).

O aumento das perdas por efeito Joule nestes equipamentos faz com que os mesmos devam ser sobredimensionados, e conseqüentemente tenham seus custos de fabricação elevados. Este fato tem sido observado em especificações de equipamentos percorridos por correntes distorcidas, principalmente em cabos e transformadores, para os quais é utilizado um fator de sobredimensionamento (Fator K). A utilização desse fator é justificada pelo aumento das perdas nesses equipamentos provocadas principalmente pela influência do efeito pelicular na resistência elétrica dos mesmos.

Tradicionalmente a análise se baseia na decomposição da corrente através da série de Fourier e na correção dos valores de resistência equivalente do equipamento devido ao efeito pelicular. As perdas são calculadas para cada harmônico de corrente ($R_h I_h^2$) e a perda total resulta no somatório das mesmas. Essa metodologia parte de duas premissas:

- A corrente elétrica de comportamento não senoidal, desde que periódica, pode ser representada por uma soma de correntes cujas amplitudes e frequências são definidas pela série de Fourier;
- A perda por efeito Joule provocada pela corrente não senoidal é igual a soma das perdas provocadas por cada uma das correntes (fundamental e harmônicas) corrigindo-se a(s) resistência(s) do circuito equivalente ao equipamento em função do efeito pelicular.

Este é um método clássico que tem como “dogma” o fato de que neste caso a superposição é válida, ou seja, considera-se que cada harmônico de corrente existe sem a

presença dos outros. Em outras palavras, esta forma de análise permite o levantamento de dois questionamentos básicos:

- É válida a forma de correção do valor da resistência equivalente em função da frequência devido ao efeito pelicular?
- É validado o teorema da superposição, ou seja, a forma de obtenção da perda total?

Este efeito superposição pode conduzir a valores de perdas por efeito Joule mais, ou menos, elevados do que ocorre realmente. Desta maneira, quando do projeto de equipamentos elétricos podem ocorrer casos de sobredimensionamento, tendo como consequência fundamental um investimento financeiro desnecessário no processo de construção dos mesmos, ou casos de subdimensionamento, tendo como efeito a construção de equipamentos incapazes de realizar suas funções.

1.3 Objetivos e Contribuições Esperadas

O que se propõe neste trabalho é uma análise da validade dessa solução convencional para o dimensionamento através de medições laboratoriais, principalmente através da medição do aquecimento em equipamentos elétricos, tais como resistores e transformadores. Desta maneira classificam-se como possíveis e espera-se o alcance de quatro principais objetivos:

- Obtenção prática do comportamento da resistência em função da frequência;
- Análise do acréscimo de perdas em resistores e transformadores devido à circulação de correntes distorcidas;
- Avaliação da validade da superposição proveniente da aplicação das séries de Fourier;
- Desenvolvimento de um procedimento para o dimensionamento de equipamentos elétricos submetidos a condições não lineares de carga, objetivando minimizar os riscos de sub ou sobredimensionamento e da consequente perda financeira.

1.4 Questionamentos Acerca do Tema

Prezando pelo bom entendimento do tema do trabalho em si, é interessante realizar alguns comentários acerca do surgimento das idéias, em complemento à relevância do tema.

No entanto, a pertinência desses comentários deve se associar à apresentação dos mesmos em forma de questionamentos, da maneira tal como estão citados em seqüência:

- O efeito pelicular se comporta de maneira idêntica para senóides de diversas frequências (harmônicas) e para transitórios? Em outras palavras, às vistas da influência do efeito pelicular pode-se substituir uma onda quadrada por uma soma de senóides?
- Sabe-se que as perdas em transformadores aumentam proporcionalmente ao aumento da frequência. Desta maneira, qual a diferença entre o impacto de uma onda distorcida e uma onda senoidal nas perdas? Ou ainda, entre se ter uma onda distorcida e um somatório de senóides de diversas frequências?
- O problema do aumento das perdas não está relacionado com a taxa de variação da forma de onda da tensão ou da corrente? Não é a mudança de sentido do sinal mais frequente que acarreta no acréscimo das perdas? Por exemplo, para as perdas por correntes parasitas, no final das contas, a tensão induzida nas subidas e descidas da onda quadrada corresponde à induzida pelo somatório das induzidas por cada harmônica?
- O aumento real das perdas no transformador é dado pela variação da temperatura entre as situações linear e não linear. Qual a diferença das perdas adicionais obtidas através da variação da temperatura e através do cálculo baseado na superposição da série de Fourier?
- Na Figura 1.1 têm-se formas de onda compostas por fundamental e quinto harmônico, este último com quatro possibilidades de defasagem com relação à primeira: 0° , 45° , 90° e 180° . Com base nas formas de onda pode-se dizer que o aquecimento provocado por cada uma delas é idêntico? Mesmo sabendo que os valores eficazes e distorções harmônicas totais são idênticos para as quatro formas de onda, a cada instante de tempo as ondas assumem valores diferentes. Ainda assim, o aquecimento provocado por cada uma delas é idêntico?

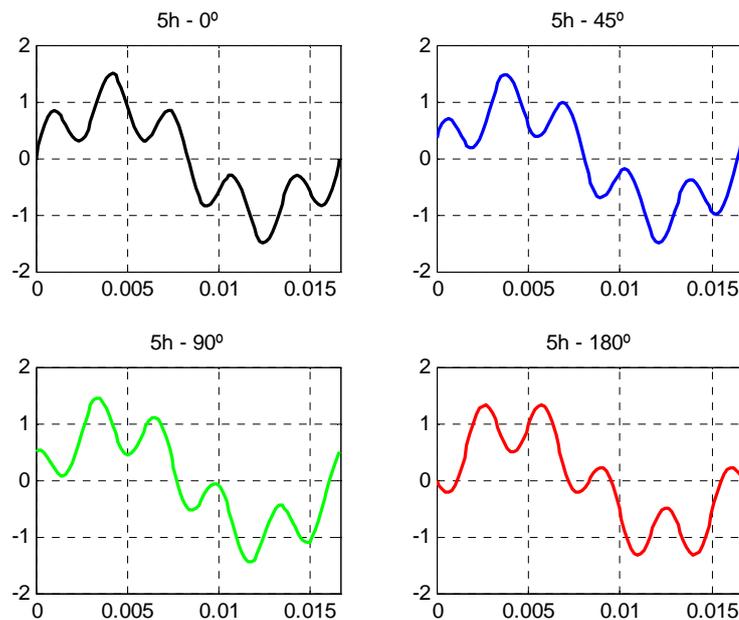


Figura 1.1 – Comparação de defasagem de 5º harmônico.

1.5 Estrutura da Tese

A presente tese de doutorado está dividida em 8 capítulos, a saber:

- Capítulo 1 – Introdução: capítulo no qual são expostos os objetivos acerca do trabalho, bem como são citadas as contribuições esperadas. Além disso, é contado como ocorreu o surgimento do tema em si, justificando sua relevância. Também é exposta a metodologia de trabalho utilizada;
- Capítulo 2 – Análise Teórica: são comentados os resultados obtidos por alguns trabalhos publicados, acerca dos seguintes principais tópicos: Influência do efeito pelicular nas perdas em equipamentos elétricos; Acréscimo de perdas em equipamentos elétricos submetidos a condições não senoidais.
- Capítulo 3 – Concepção do Sistema de Medição: nesse capítulo tem-se o objetivo de apresentar os dois sistemas utilizados para os ensaios laboratoriais. No primeiro o foco de medição se trata de um resistor e no segundo um transformador. Ambos são detalhados através de fotos e comentários descritivos;

-
- Capítulo 4 – Simulações Computacionais: capítulo no qual são analisados alguns resultados obtidos, a partir das topologias dos sistemas de medição, através de simulações computacionais. O principal objetivo do mesmo é obter resultados suficientes para ter-se condição de realizar uma análise comparativa entre a teoria e as medições;
 - Capítulo 5 – Medições e Análises dos Resultados do Sistema 1: esse capítulo tem por objetivo, além da apresentação dos resultados obtidos via medições com o sistema 1, realizar a análise de cada um deles. São expostas algumas conclusões e, até mesmo, são respondidos alguns dos questionamentos iniciais;
 - Capítulo 6 – Medições e Análises dos Resultados do Sistema 2: o objetivo desse capítulo é idêntico ao do capítulo 5, porém com base nos resultados obtidos via medições do sistema 2;
 - Capítulo 7 – Sugestão para o Dimensionamento de Transformadores: capítulo destinado à apresentação de uma proposta alternativa para o dimensionamento de transformadores alimentadores de cargas não lineares, baseada no aquecimento do mesmo.
 - Capítulo 8 – Conclusões: Por fim, nesse, são comentados os resultados alcançados, a comparação com as expectativas, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Análise Teórica

*“Duvidar de tudo ou crer em tudo, são duas
soluções igualmente cômodas, que nos
dispensam, ambas de refletir.”*

Henri Poincaré

2.1 Considerações Iniciais

Esse capítulo tem por objetivo descrever os procedimentos encontrados na literatura acerca da influência de formas de onda de corrente distorcidas nas perdas em equipamentos elétricos. Para tanto, nos itens subseqüentes adota-se uma abordagem na qual se faz desde a descrição da influência do efeito pelicular nas perdas em equipamentos elétricos, até a análise do acréscimo das perdas, em cabos e transformadores, devido à circulação de correntes distorcidas.

2.2 Influência do Efeito Pelicular nas Perdas em Equipamentos Elétricos

Nessa seção são apresentados alguns trabalhos que analisam a influência do efeito pelicular em condutores e/ou resistores. Além da análise do fenômeno, são mostrados alguns modelos matemáticos e computacionais desenvolvidos visando a obtenção da influência deste efeito em sistemas elétricos.

Arnold (1937) traz uma formulação aproximada, desenvolvida teoricamente, para o cálculo da resistência AC em condutores ocios. Resultados experimentais são obtidos com exatidão de aproximadamente 2% para todas as frequências testadas.

A formulação desenvolvida para a obtenção de R_{AC} é mostrada na equação (2.1).

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1 + \frac{c_1 \left(\frac{\omega}{R_{DC}} \right)^2}{\left(1 + \left(\frac{c_2}{c_1 n} \right) \cdot \left(\frac{\omega}{R_{DC}} \right)^2 \right)^n} \quad (2.1)$$

Onde ω é a frequência angular, c_1 é a condutividade e c_2 é a permissividade do material, n é o número de iterações necessárias para a convergência do resultado.

Os resultados, calculados e medidos, para um condutor sólido, com espessura e área especificadas, são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Comparação dos valores calculados e medidos.

$\frac{\omega}{R_{DC}}$	$\frac{R_{AC}}{R_{DC}}$ calculado	$\frac{R_{AC}}{R_{DC}}$ medido
0,9025	1,074	1,069
1,8225	1,257	1,253
3,6864	1,683	1,665
7,7284	2,373	2,355
10,890	2,765	2,771
14,440	3,140	3,140
18,063	3,470	3,470
21,716	3,780	3,760

Observa-se que a R_{DC} pode assumir qualquer valor e que a variação da frequência é diretamente proporcional à variação da primeira coluna da Tabela 2.1.

O'Dell (1996) traz a informação de que o conceito de profundidade de penetração (penetration depth) pode ser usado na estimativa da distribuição de corrente em um condutor submetido a correntes transitórias, da mesma maneira que o clássico conceito de profundidade pelicular (skin depth) é utilizado na estimativa da distribuição de correntes senoidais. O conceito é abordado tanto teoricamente quanto através de um experimento.

Teoricamente, através da utilização do conceito de distribuição de corrente no condutor, obtém-se uma solução para a profundidade de penetração, explicitada na equação (2.2).

$$\delta_p = \sqrt{\frac{\pi \cdot t}{\mu \cdot \sigma}} \quad (2.2)$$

Onde t é o tempo, tal que quanto maior, menor a corrente transitória, μ é a permeabilidade e σ é a condutividade.

Foi realizado um experimento através da aplicação de um pulso de corrente de 1 A durante 50 μ s em uma linha de transmissão do tipo *microstrip*¹ tendo o cobre como material condutor. Para tal ensaio, obteve-se o resultado de $\delta_p = 0,57 \text{ mm}$. Valor que se aproxima bastante do obtido teoricamente, a saber: $\delta_p = 0,50 \text{ mm}$.

¹ Microstrip é um tipo de linha de transmissão planar na qual a fita de metal condutor está em planos paralelos separados por um dielétrico. Dimensões típicas de uma microstrip são: espessura do dielétrico de 0,25 a 1mm e largura de fita condutora de 0,1 a 5mm.

O autor conclui que o conceito de profundidade de penetração, comparado ao clássico conceito de profundidade pelicular $\delta_\omega = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}}$ para correntes senoidais, pode ser utilizado com boas aproximações para correntes transitórias, pulsos, entre outros.

Zunec (2006) discute a questão do impacto do efeito pelicular na distribuição de corrente e temperatura em condutores elétricos do tipo aéreo.

Foi realizada uma modelagem computacional de um condutor típico de linha de transmissão. Esse modelo foi submetido a uma bateria de simulações.

As simulações objetivaram avaliar a distribuição de corrente e temperatura quando da submissão do condutor a diversas correntes de curto-circuito.

Para uma corrente com valor eficaz de 30 kA e duração de 1 segundo foi obtida a distribuição de temperatura, como mostra a Figura 2.1, bem como o comportamento da temperatura em função da distância ao centro do condutor, como ilustrado na Figura 2.2. Por outro lado, também foi obtida, como mostra a Figura 2.3, a distribuição de corrente também em função da distância ao centro do condutor.

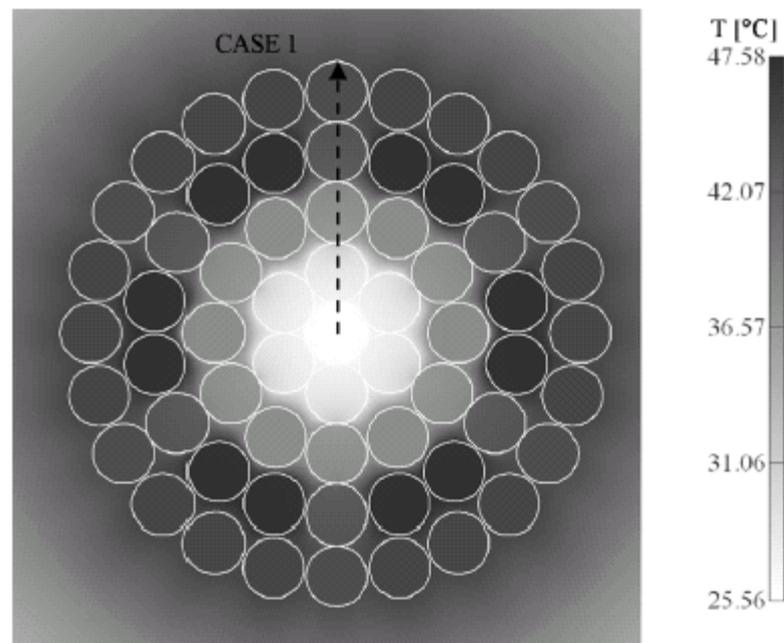


Figura 2.1 – Distribuição de temperatura no condutor. (Zunec, 2006)

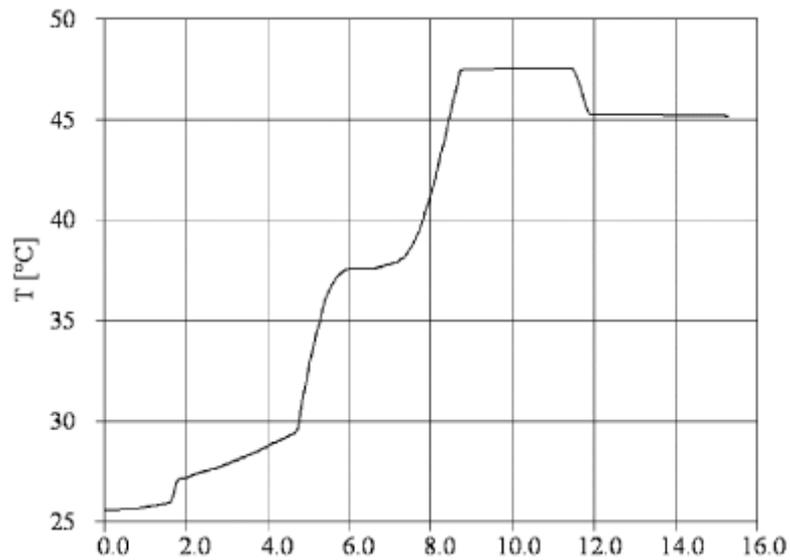


Figura 2.2 – Temperatura em função da distância ao centro do condutor em mm.
(Zunec, 2006)

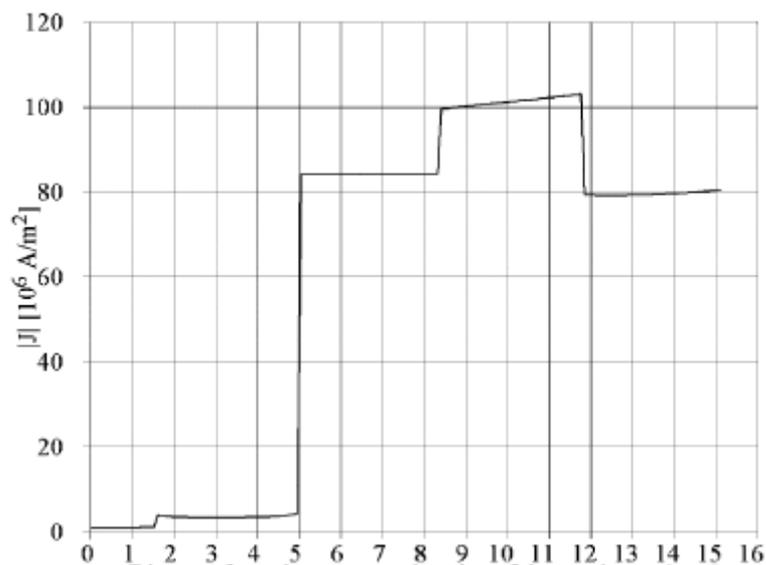


Figura 2.3 – Corrente em função da distância ao centro do condutor em mm.
(Zunec, 2006)

O autor justifica a utilização de simulações computacionais para esse tipo de análise devido ao fato da raridade de existência de trabalhos experimentais.

Kim (1996) publicou um trabalho no qual foi desenvolvido um modelo computacional para o cálculo do efeito pelicular em cabos de seção circular.

O modelo se baseia na utilização de quatro resistências e três indutâncias. A Figura 2.4 traz uma ilustração correspondente ao modelo em questão.

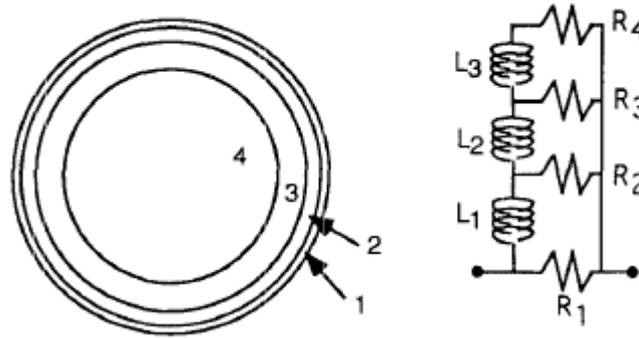


Figura 2.4 – Modelo desenvolvido por Kim (1996).

Onde $R_1 = \alpha_R \cdot R_{DC}$, $\frac{R_i}{R_{i+1}} = RR$, sendo RR uma constante, a ser determinada, de relação de resistências.

Desta forma, para quatro seções tem-se:

$$(RR)^3 + (RR)^2 + RR + (1 - \alpha_R) = 0$$

A constante α_R é obtida através de uma definição clássica de efeito pelicular:

$$\alpha_R = 0,53 \cdot \frac{\text{raio}}{\delta_{\max}}$$

$$\text{Onde } \delta_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\omega_{\max} \cdot \mu \cdot \sigma}}$$

Para os indutores é utilizada a seguinte constante:

$$\alpha_L = 0,315 \cdot \alpha_R$$

A título de exemplo foi modelado um cabo coaxial, cujos resultados de impedância total calculada são mostrados na Figura 2.5.

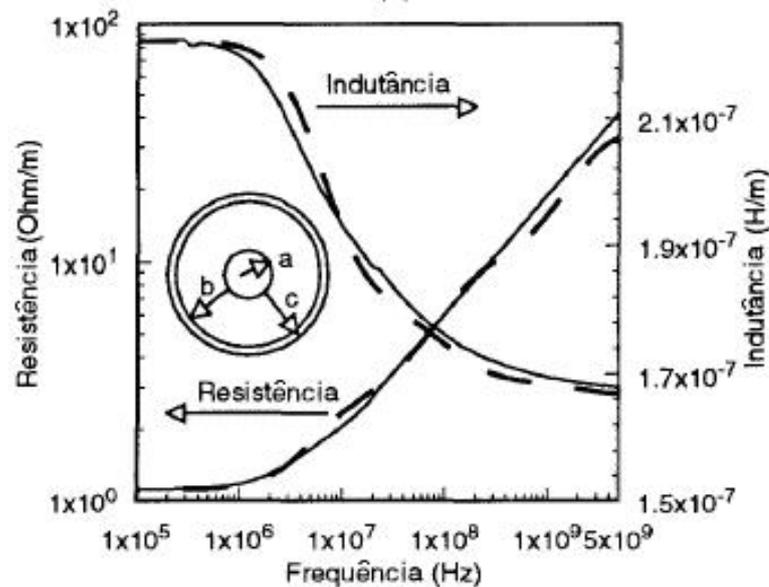


Figura 2.5 – Impedância total calculada para o cabo coaxial.
(Kim, 1996)

No trabalho de Gatous e Pissolato Filho (2004). A formulação e o modelo do circuito equivalente são obtidos da solução da equação de onda de Maxwell de um campo elétrico excitando um condutor cilíndrico sólido na direção de propagação. O resultado final é a admitância interna levando-se em conta o efeito pelicular. A critério de exemplificação prática é apresentado na Figura 2.6 o gráfico da resistência em função da frequência de um condutor cilíndrico de cobre puro a 20 °C com condutividade $\sigma = 5,88 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$.

Pode-se observar que para raios $R = 1 \text{ mm}$ e $R = 10 \text{ mm}$, a resistência parte de seu valor DC e se mantém constante até 10^4 Hz e 10^2 Hz respectivamente. Além disso, quanto menor for o raio do condutor, mais alta deverá ser a frequência para sensibilizar o valor da resistência. Dessa maneira conclui-se, portanto, que com o aumento da frequência a resistência aumenta, a indutância interna diminui, porém a impedância também aumenta na mesma proporção que a resistência, sendo todas essas variações lineares e proporcionais à raiz quadrada da frequência.

Para comprovar a influência do raio do condutor na resistência frente ao aumento de frequência, (Mingli, 2004), utilizou as funções de Bessel para calcular a impedância interna de condutores cilíndricos contínuos e tubulares, levando-se em consideração o efeito pelicular. A contribuição deste artigo consiste na comprovação de que quanto maior é a espessura do tubo, mais inclinada é curva, ou seja, mais rapidamente a resistência aumenta

com a frequência. Para uma maior sensibilidade na análise, é apresentado na Figura 2.7 o gráfico correspondente.

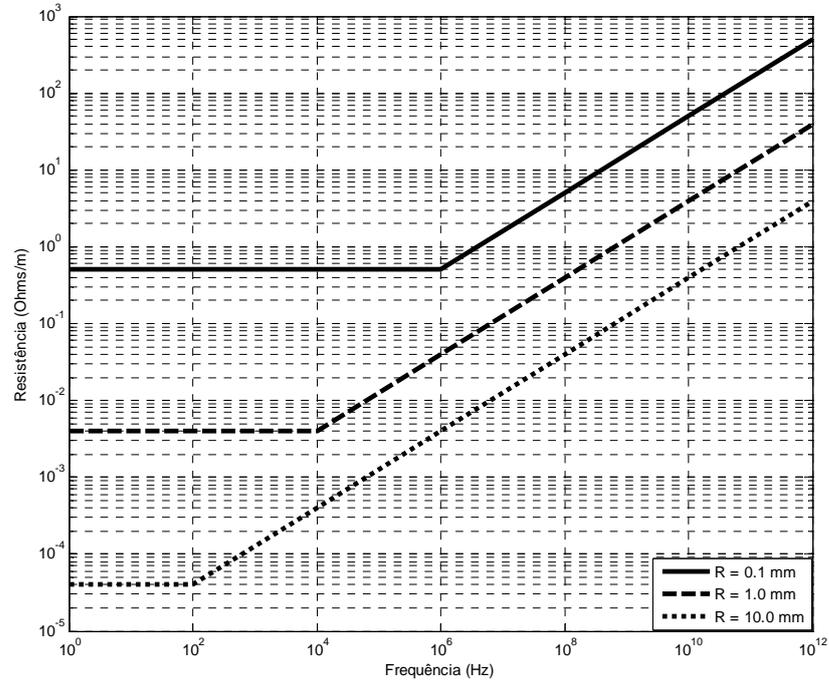


Figura 2.6 – Resistência efetiva do cobre a 20 °C.
(Gatous e Pissolato Filho, 2004).²

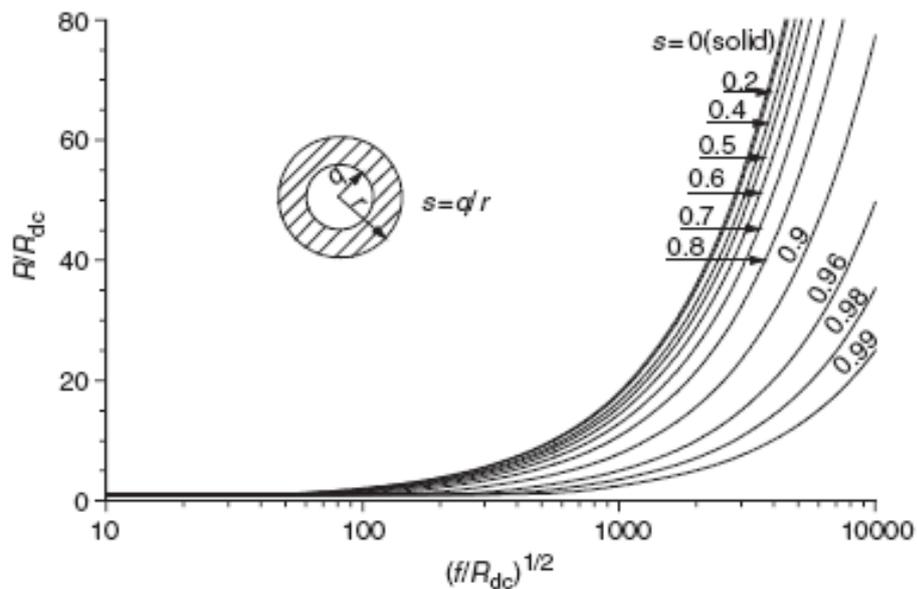


Figura 2.7 – Comportamento da resistência de condutores cilíndricos tubulares.
(Mingli, 2004)

² Para se obter uma melhor visualização, essa figura foi reconstituída com base nos dados contidos no trabalho original. (Gatous e Pissolato Filho, 2004).

Além disso, de acordo com Knowlton (1967), a resistência efetiva de um condutor cilíndrico na presença de uma corrente alternada senoidal de uma dada frequência (R_{ac}) é calculada pela equação (2.3).

$$R_{ac} = k \cdot R_{dc} \quad (2.3)$$

Onde R_{dc} é a resistência em corrente contínua em Ω/km à temperatura de trabalho, k é chamado de coeficiente pelicular e vem dado em uma tabela em função de x , o qual na prática é dado pela equação (2.4).

$$x = 0,050136 \sqrt{\frac{f \cdot \mu}{R_{dc}}} \quad (2.4)$$

Outra formulação aparentemente muito parecida com a apresentada na equação (2.4) está apresentada em uma nota de cálculo (Pirelli). Nesta, a resistência R_{ac} é calculada através da soma de R_{dc} com um delta devido ao efeito pelicular, o qual para condutores redondos é o resultado da multiplicação de R_{dc} por um $F(x)$ tabelado em função de x , onde x nesse caso, é dado pela equação (2.5).

$$x = 0,05013 \sqrt{\frac{f \cdot K_s}{R_{dc}}} \quad (2.5)$$

Onde K_s para os condutores em questão, é igual a 1.

Além das referências supracitadas, outro trabalho analisado foi o de Berleze e Robert (2003). Neste trabalho são apresentados gráficos nos quais pode ser constatado o aumento da resistência devido ao efeito pelicular em relação à frequência, como pode ser visto na Figura 2.8.

A curva do gráfico é referente a um condutor de cobre de secção quadrada de lado igual a 5 mm e é baseada a formulação proposta por esse artigo. Além disso, o comportamento encontrado foi comparado com os resultados experimentais publicados por Arnold (1938).

Por fim, é explicitado, na Figura 2.9, outro gráfico retirado deste mesmo artigo mostrando a distribuição da densidade de corrente com relação às coordenadas x e y em mm referentes à seção transversal quadrada de um condutor de cobre de 10 mm na aplicação de um sinal de frequência única.

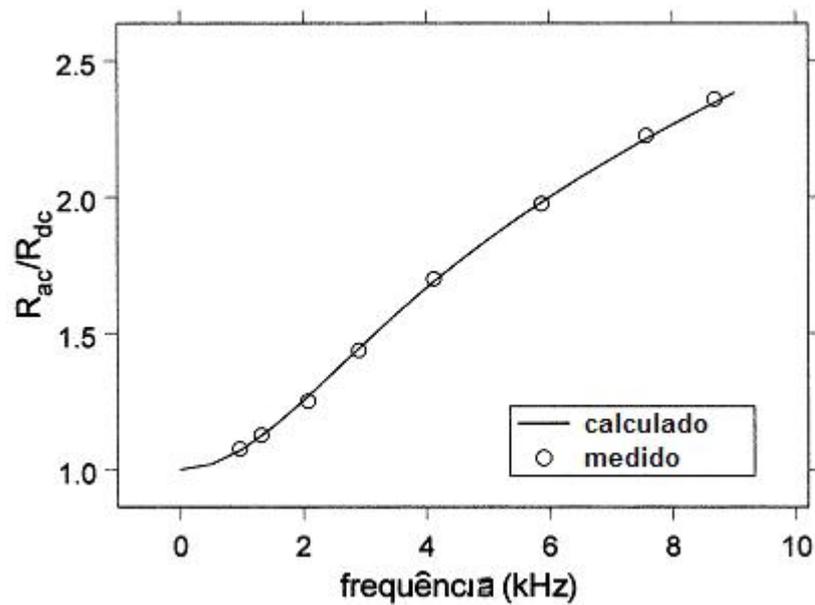


Figura 2.8 – Comportamento da resistência de condutores cilíndricos quadrados.
(Berleze e Robert, 2003)

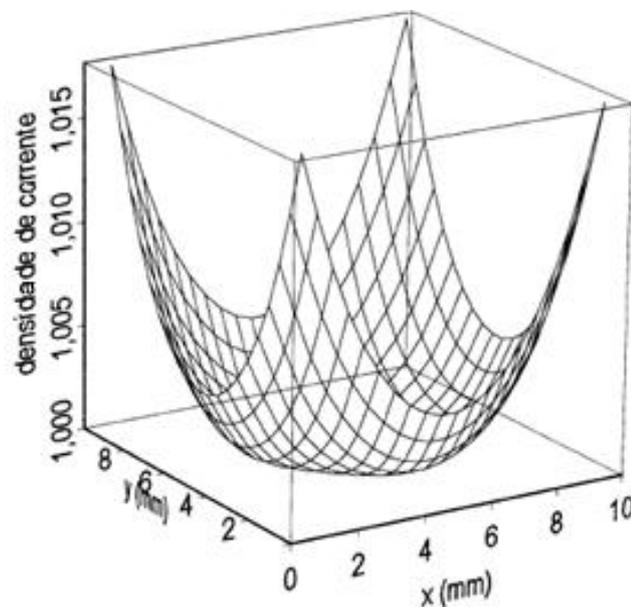


Figura 2.9 – Distribuição da densidade de corrente em relação à seção transversal.
(Berleze e Robert, 2003)

Observa-se que quanto mais se aproxima das extremidades, maior é a densidade de corrente. Ademais, o centro do condutor é o ponto de menor densidade de corrente, comprovando a existência do efeito pelicular.

2.3 Acréscimo de Perdas em Equipamentos Elétricos submetidos a Condições Não-Senoidais

Sabendo-se do comportamento esperado da influência do efeito pelicular nas perdas elétricas, faz-se uma coletânea das publicações que trabalham com o acréscimo de perdas em equipamentos elétricos, especificamente, condutores e transformadores.

2.3.1 Condutores Elétricos

Maksiejewski (1990) publicou um artigo que mostra os resultados computacionais das perdas em um condutor cilíndrico causadas por surtos de correntes levando em conta o efeito pelicular. Neste presente trabalho, o propósito é de avaliar o efeito de vários parâmetros nas perdas e examinar o significado dessas perdas na prática.

Inicialmente foi notado que o tipo de material do condutor e os parâmetros do impulso de corrente afetam as características térmicas do condutor, como pode ser visualizado na Figura 2.10.

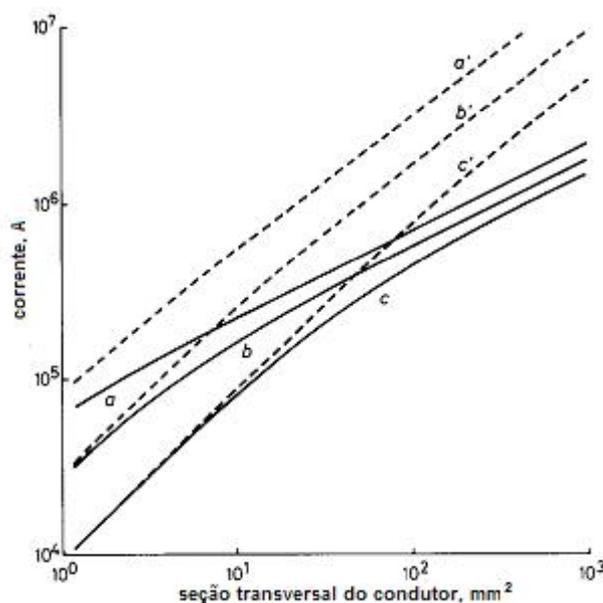


Figura 2.10 – Relação entre impulso de corrente e seção do condutor.
(Maksiejewski, 1990)

Na Figura 2.10 é importante observar que as linhas cheias são baseadas nas perdas na superfície e as linhas pontilhadas são baseadas nas perdas totais. Os índices a, b e c indicam respectivamente os materiais cobre, alumínio e aço. Nota-se que os valores

necessários da secção transversal do condutor para um dado impulso de corrente e uma dada variação de temperatura $\Delta\theta$ são maiores para os cálculos baseados nas perdas na camada superficial.

Outro fato notável é que o efeito pelicular é muito mais relevante quando o tempo do impulso é menor. Já para um tempo de impulso maior, o efeito pelicular é menor e as curvas são próximas.

Já na Figura 2.11, nota-se o efeito do tipo de material com relação as características das curvas, onde o tempo do impulso foi sustentado e a variação da temperatura superficial foi mantida ($\Delta\theta = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dois tipos de condutores são utilizados: condutor de cobre e de aço.

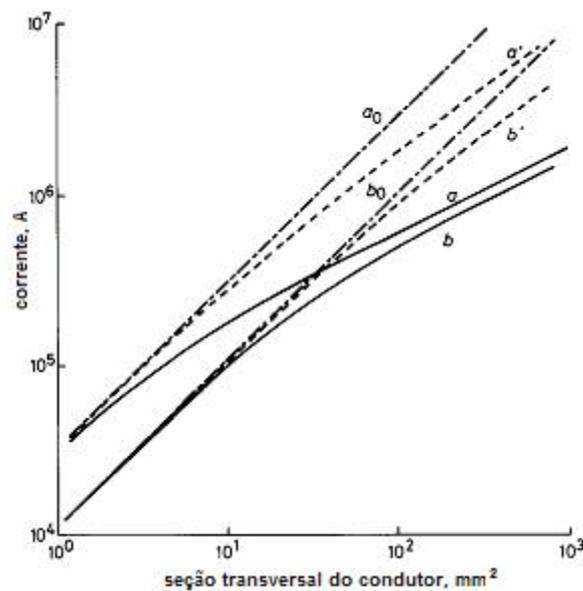


Figura 2.11 – Efeito do tipo de material. (Maksiejewski, 1990)

As perdas são calculadas computacionalmente. Neste gráfico da Figura 2.11, há três tipos de perdas: totais (pontilhado), desconsiderando o efeito pelicular (traço-ponto), e as perdas superficiais (linha contínua). A seção transversal obtida desconsiderando o efeito pelicular é menor que considerando as perdas totais. Isto avaliado para uma mesma corrente e $\Delta\theta$.

A Figura 2.12 mostra a temperatura da superfície do condutor de cobre com 25 mm^2 de área de seção transversal como uma função da magnitude do impulso de corrente computado para os três tipos básicos de impulso. Há também uma comparação entre a temperatura do condutor de aço com 50 mm^2 de área de seção transversal. Nota-se que para

uma mesma temperatura superficial, é necessário uma menor corrente para produzir essa temperatura no caso do condutor de aço em relação ao de alumínio, mesmo com uma área de seção transversal maior.

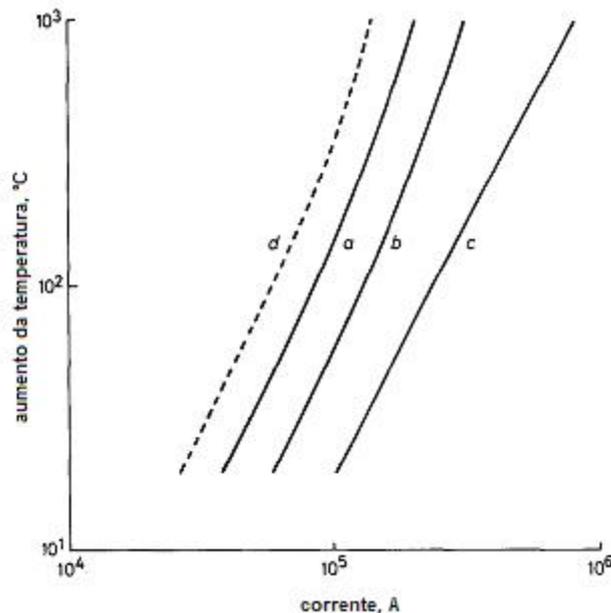


Figura 2.12 – Temperatura da superfície do condutor.
(Maksiejewski, 1990)

Por fim, cálculos demonstraram que para o condutor de aço é necessária uma seção transversal maior que o condutor de cobre. Paralelamente, concluiu-se que, para impulsos de corrente com maior duração, a seção transversal requerida foi maior do que para impulsos de menores durações.

Meliopoulos (1992) apresenta um procedimento para o cálculo das perdas ôhmicas, na presença de harmônicos, em cabos de distribuição secundários, através da adaptação de um modelo aplicado em 60 Hz. De posse desses resultados são calculadas, para os cabos, as correntes máximas bem como os fatores de redução de carga (*derating*) devido aos harmônicos.

O procedimento computacional utilizado para avaliar as perdas ôhmicas na presença de harmônicos é dado pela equação (2.6).

$$P_{loss} = \sum_{n \in N} r_{ac(n)} I_n^2 \quad (2.6)$$

Onde:

$r_{ac(n)}$ - resistência do cabo com harmônico de n-ésima ordem

I_n - o valor eficaz da corrente de harmônico de n-ésima ordem

A contribuição do efeito pelicular é dada pela equação (2.7).

$$X_s(n) = \frac{k_a}{2} \frac{M_0(k_a)}{M_1(k_a)} \operatorname{sen} \left(\theta_1(k_a) - \theta_0(k_a) - \frac{\pi}{4} \right) - 1 \quad (2.7)$$

Onde:

$$k = \sqrt{\mu\sigma 2\pi 60n};$$

a - raio do condutor;

μ - permeabilidade do condutor;

σ - condutividade do condutor;

n - ordem do harmônico;

As funções $M_0(k_a)$, $M_1(k_a)$, $\theta_0(k_a)$ e $\theta_1(k_a)$ são obtidas das funções de Bessel.

Paralelamente também é considerada a influência do efeito de proximidade entre os cabos.

O fator de redução de carga (*derating*) é definido pela equação (2.8).

$$k = \sqrt{\frac{\alpha_1^2 I_B^2 (r_{ac,A}(1) + r_{ac,B}(1) + r_{ac,C}(1))}{P_{loss}}} \quad (2.8)$$

Onde:

$r_{ac,A}(1)$ - resistência AC do condutor da fase A para a frequência fundamental;

$r_{ac,B}(1)$ - resistência AC do condutor da fase B para a frequência fundamental;

$r_{ac,C}(1)$ - resistência AC do condutor da fase C para a frequência fundamental;

P_{loss} - perdas ôhmicas totais no sistema, incluindo as perdas devido aos harmônicos em todos os condutores;

$\alpha_1^2 I_B^2$ - a magnitude da corrente elétrica de frequência fundamental nas três cabos das fases do sistema;

Por outro lado, a máxima corrente é dada pela equação (2.9).

$$I = \sqrt{\frac{T_C - T_A}{R_{dc} (1 + Y_C) \bar{R}_{ca}}} \text{ [kA]} \quad (2.9)$$

Onde:

T_C - temperatura máxima de operação do condutor (°C);

T_A - temperatura ambiente (°C);

R_{dc} - resistência DC do condutor (microohms por pé);

Y_C - aumento da resistência devido aos efeitos pelicular e de proximidade;

\bar{R}_{ca} - resistência térmica entre o condutor e o ambiente;

Após a realização dos cálculos para um determinado caso teste, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 2.2 para o condutor da fase A e na Tabela 2.3 para o condutor neutro.

Tabela 2.2 – Resistências e perdas ôhmicas para a fase A.

	Amplitude do harmônico	Corrente (A)	Fator de efeito pelicular (X_s) (m)	Proximidade de entre condutores (X_{sp}) (m)	Proximidade e entre conduítes (X_{cp}) (m)	Resistência AC (R_{ac}) (Ω/m)	Perdas (W)	
Fund	1,0	350	0,00735	0,01761	0,00107	0,0001082	13,2545	
3° h	0,2285	80	0,08549	0,16725	0,00964	0,000133	0,8512	
5° h	0,0343	12	0,22029	0,33224	0,02679	0,000167	0,02405	
7° h	0,0343	12	0,37462	0,46214	0,05251	0,0002	0,0288	
Totais	THD	I_{RMS}						P_{loss}
	0,233	359,43	$r_{ac,ef} = 0,0001096 \Omega$					14,158

Tabela 2.3 – Resistências e perdas ôhmicas para o condutor neutro.

	Amplitude do harmônico	Corrente (A)	Fator de efeito pelicular (X_s) (m)	Proximidade de entre condutores (X_{sp}) (m)	Proximidade de entre conduítes (X_{cp}) (m)	Resistência AC (R_{ac}) (Ω/m)	Perdas (W)	
Fund	1,0	350	0,00735	0,01761	0,00107	0,0001082	13,2545	
3° h	0,2285	80	0,08549	0,16725	0,00964	0,000133	0,8512	
5° h	0,0343	12	0,22029	0,33224	0,02679	0,000167	0,02405	
7° h	0,0343	12	0,37462	0,46214	0,05251	0,0002	0,0288	
Totais	THD	I_{RMS}						P_{loss}
	0,233	359,43	$r_{ac,ef} = 0,0001096 \Omega$					14,158

O autor demonstra satisfação com os resultados, uma vez que foram obtidos valores esperados através do método desenvolvido, que o mesmo considera simplificado. Paralelamente, Ficou estabelecido que, para impulsos de correntes com maior duração, a seção transversal requerida foi maior do que para impulsos de menores durações. Além disso, o estudo mostra que o cálculo baseado nas perdas superficiais é mais usual em considerações práticas.

Anders (2004) propõe um método para estimar a temperatura e as perdas nos condutores como uma função da corrente e de alguns parâmetros relativos às condições nominais de carga. Há dois enfoques principais: o primeiro relativo a cabos com correntes medidas e o cálculo da resistência térmica externa com o fator de carga apropriado.

O aumento da temperatura na superfície do condutor é relacionado com as perdas através da equação (2.10).

$$\Delta\theta = n(W_c T_t + \Delta\theta_d) - \theta_x \quad (2.10)$$

Onde:

n - número de condutores no cabo;

$\Delta\theta_d$ - variação da temperatura causada pelas perdas no dielétrico;

T_t - resistência térmica total (Km/W);

W_c - perda no condutor (W/m);

θ_x - temperatura inicial.

Já o cálculo da variação da temperatura do condutor como um todo é dado pela expressão (2.11).

$$\Delta\theta = \frac{\theta_1 \left(\frac{I}{I_R} \right)^2 + \theta_2}{c_1 + c_2 \left[1 - \left(\frac{I}{I_R} \right)^2 \right]} \quad (2.11)$$

Onde:

θ_1 e θ_2 - coeficientes de variação de temperatura em função da temperatura ambiente;

c_1 e c_2 - coeficientes de expansão linear devido ao aumento da temperatura;

I e I_R - correntes medida e nominal.

As perdas totais no cabo devido a uma corrente I são calculadas através da equação (2.12).

$$W_t = W_d + (W_{tR} - W_d) \left(\frac{I}{I_R} \right)^2 v_\theta \quad (2.12)$$

Onde $v_\theta = \frac{c_3}{c_1 + c_2 \left[1 - v_r \left(\frac{I}{I_R} \right)^2 \right]}$ com $c_3 = 1 + \alpha_T [\theta_{amb} - 20 + (\Delta\theta_d - \theta_x)]$.

Os resultados dos cálculos da temperatura no condutor e das perdas em função da corrente são mostrados na Figura 2.13 e na Figura 2.14.

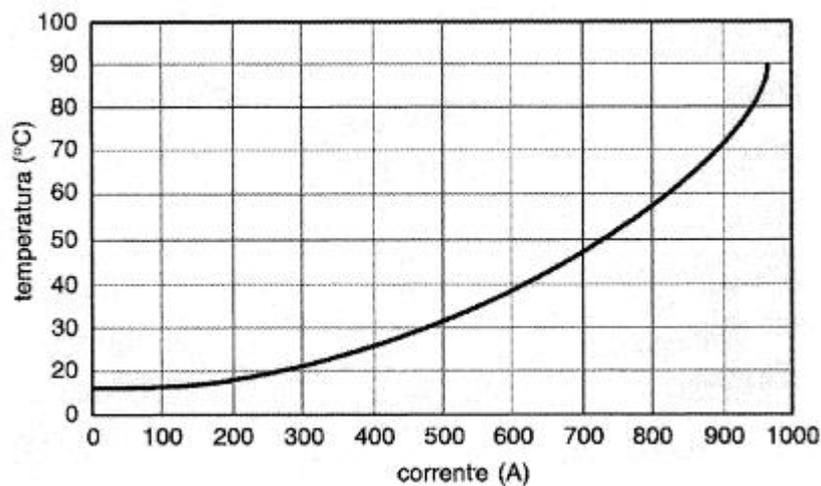


Figura 2.13 – Temperatura do condutor. (Anders, 2004)

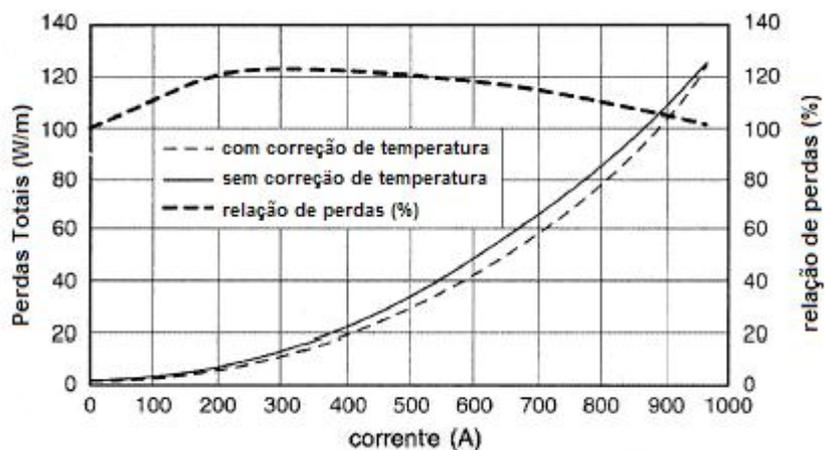


Figura 2.14 – Perdas totais. (Anders, 2004)

Também é avaliado o cálculo do fator de perda (*loss factor*), onde é mostrada a variação do mesmo com a corrente Figura 2.15.

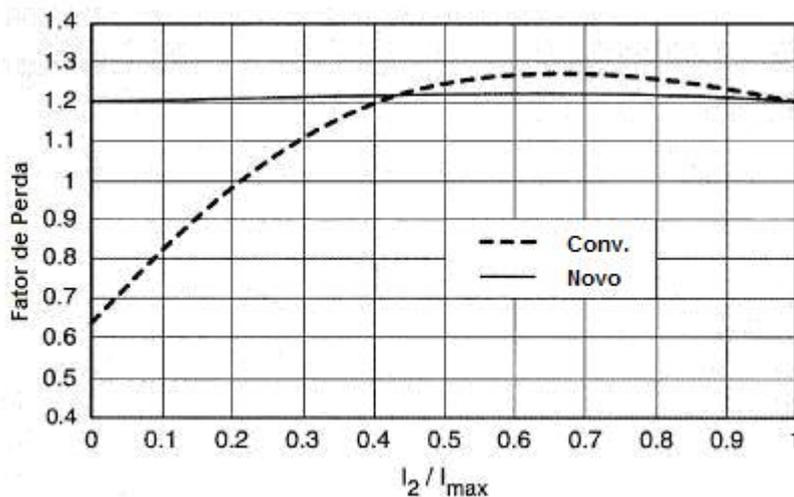


Figura 2.15 – Fator de perda. (Anders, 2004)

Na Figura 2.15 pode-se observar a comparação de obtenção do fator de perda através do cálculo convencional e do novo método.

Em suma, os resultados mostram que o método abordado calculou perdas com uma exatidão satisfatória, além de ser economicamente viável. O cálculo do fator de perda como função da temperatura foi mostrado. O erro cometido depende das condições de carga nominal. Para esse artigo, por exemplo, o erro foi de 4%.

Pacheco (2000) realiza uma análise térmica e da expectativa de vida dos cabos para uma tensão distorcida e para uma corrente dependente das condições de carga. Para isso, foram utilizados modelos térmico e elétrico. Em paralelo, também foi feito um estudo computacional com o intuito de ter uma avaliação da variação da temperatura no cabo, bem como o efeito da redução da vida útil deste com uma dada condição de distorção da tensão e corrente.

Primeiramente são calculadas as perdas nos cabos através da equação (2.13).

$$P_J = Ri_{(t)}^2 \quad (2.13)$$

Onde:

P_J - perdas no cobre;

R - resistência do cabo;

$i_{(t)}^2$ - corrente no cabo elevada ao quadrado.

Já para o cálculo das perdas no dielétrico, utilizou-se a equação (2.14).

$$P_d = v(t) \cdot i_c(t) \cdot tg(\delta) \quad (2.14)$$

Onde:

P_d - perdas no dielétrico;

$v(t)$ - tensão por fase;

$i_c(t)$ - componente reativa da corrente;

$tg\delta$ - fator de perda.

De posse do valor de perdas, através do modelo térmico, obtém-se a variação da temperatura e conseqüentemente a expectativa de vida do cabo em função da distorção harmônica de tensão e corrente, respectivamente mostrados pela Figura 2.16 e pela Figura 2.17.

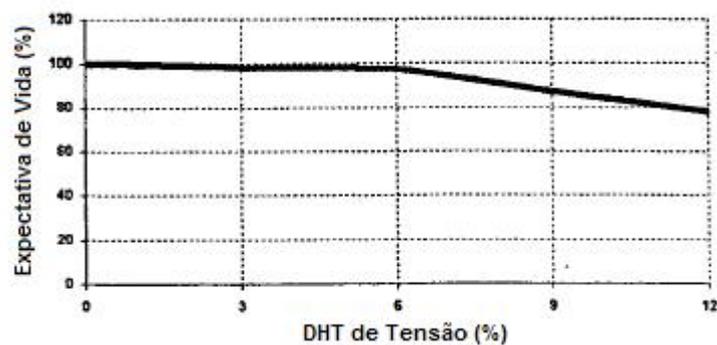


Figura 2.16 – Expectativa de vida versus THD de tensão. (Pacheco, 2000)

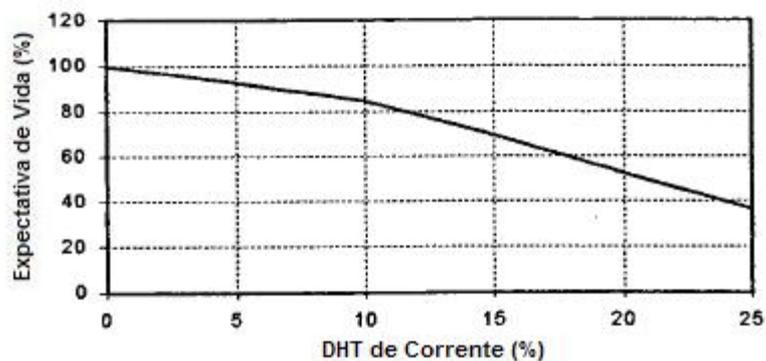


Figura 2.17 – Expectativa de vida versus THD de corrente. (Pacheco, 2000)

2.3.2 Transformadores

2.3.2.1 Cálculo Convencional de Perdas

Embora o transformador seja um equipamento que apresente elevado rendimento, não se podem desprezar suas perdas, uma vez que estas são responsáveis pelo aquecimento, tornando-se o fator limitador da sua capacidade de transferência de potência. Estas perdas podem ser divididas como ilustra a figura 2.

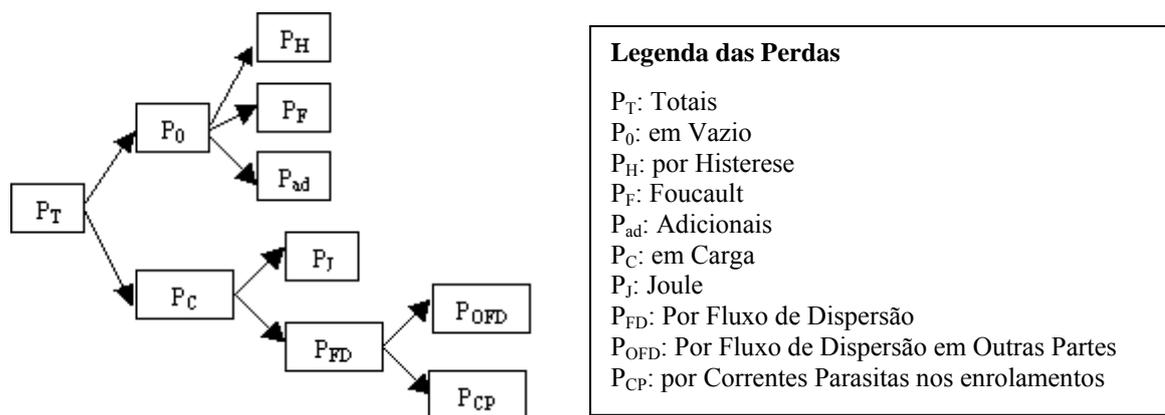


Figura 2.18 – Divisão das Perdas do Transformador.

Da figura pode-se observar que as perdas totais do transformador (P_T) são divididas em perdas em vazio (P_0) e perdas em carga (P_C).

As perdas em vazio, ou perdas no ferro aparecem devido ao fluxo de magnetização produzido pela tensão aplicada ao transformador. Estas perdas podem ser subdivididas em perdas por histerese magnética (P_H), em perdas por correntes parasitas de Foucault no núcleo (P_F) e em perdas adicionais (P_{ad}), que são as perdas suplementares no ferro e dissipações em algumas partes construtivas do transformador. As equações que definem as perdas em vazio são mostradas em (2.15), (2.16), e (2.17) conforme (Oliveira, 1984).

$$P_{H-0} = K_H B_{\max}^\sigma f \tag{2.15}$$

Onde P_{H-0} são as perdas pelo efeito de histerese sem a presença de distorção, em watts por quilograma de núcleo; K_H é um coeficiente que depende do tipo de material usado no núcleo; B é a indução (valor máximo) no núcleo em Wb/m^2 ; σ é o coeficiente de Steimmetz; e f é a frequência em Hz.

$$P_{F-0} = 2,2 f^2 B^2 d^2 10^{-3} \tag{2.16}$$

Onde P_{F-0} são as perdas por correntes parasitas sem a presença de distorção, em watts por quilograma de núcleo; f é a frequência em Hz; B é a indução máxima no núcleo em Wb/m^2 ; e d é a espessura da chapa em milímetros.

Finalmente, as perdas adicionais são:

$$P_{ad-0} = 15 \text{ a } 20\% \text{ de}(P_{H-0} + P_{F-0}) \quad (2.17)$$

Sendo assim as perdas em vazio sem a presença de distorção, estão representadas pela equação (2.18).

$$P_{0-0} = P_{H-0} + P_{F-0} + P_{ad-0} \quad (2.18)$$

Por sua vez, as perdas em carga sem a presença de distorção (P_{C-0}) podem ser subdivididas em perdas por efeito Joule (P_{J-0}) nos enrolamentos primário e secundário, em virtude de resistência elétrica dos enrolamentos, e em perdas adicionais, como consequência do fluxo de dispersão (P_{FD-0}). Este fluxo é produzido pela corrente de carga nos enrolamentos e irá atravessar o núcleo, próprio enrolamento e outras partes do transformador como grampos, tanque, etc. Desta forma as perdas por fluxo de dispersão podem ser divididas em perdas por fluxo de dispersão nos enrolamentos e perdas por fluxo de dispersão nos outros componentes (P_{OFD-0}). As perdas por fluxo de dispersão nos enrolamentos são usualmente chamadas de perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{CP-0}), pois o fluxo de dispersão, incidindo no enrolamento, dá origem a pequenas correntes em forma de vórtices. A intensidade destas correntes depende do formato e da espessura do enrolamento, da proximidade entre o enrolamento e o núcleo, da corrente de carga elevada ao quadrado e da frequência da corrente também elevada ao quadrado. Assim, as perdas em carga (sem distorção) podem ser definidas pela equação a seguir:

$$P_{C-0} = P_{J-0} + P_{CP-0} + P_{OFD-0} \quad (2.19)$$

Sedimentados esse conceitos, faz-se necessário, agora, o estudo do comportamento das perdas do transformador frente à presença de distorções harmônicas de tensão e de corrente.

2.3.2.2 Efeitos das Distorções nas Perdas de Transformadores

Transformadores são desenvolvidos para transferirem a potência requerida pela carga com as mínimas perdas sob a frequência fundamental. Desta forma tensões e correntes distorcidas, por serem compostas de componentes de frequência fundamental e suas

múltiplas, contribuem para o aumento das perdas e por conseqüência do aquecimento do transformador. Será feita, aqui, uma análise do comportamento das perdas em vazio e das perdas em carga, frente a estas situações.

a) Efeitos da Distorção de Tensão nas Perdas em vazio

Sabe-se que as perdas em vazio são provocadas pelo fluxo de magnetização produzido pela tensão aplicada no lado primário do transformador. Desta maneira, se a tensão aplicada for distorcida, ou seja, apresentar componentes de freqüências maiores que a da fundamental, ocorrerá um acréscimo das perdas no núcleo, pois, como visto, as perdas por histerese são proporcionais à freqüência e as perdas por correntes parasitas de Foucault no núcleo são proporcionais ao quadrado da freqüência. O quanto tais perdas irão aumentar dependerá do módulo de cada harmônico de tensão associado à ordem harmônica de cada componente. As perdas por histerese e as perdas por correntes parasitas são obtidas pelas expressões (2.20) e (2.21) respectivamente. Tais formulações podem ser encontradas em (Delaiba, 1996), onde P_H é a perda por histerese e P_F é a perda por correntes parasitas corrigidas com a distorção presente no sinal de tensão.

$$P_H = P_{H-0} \left(\sum_{h=1}^{\infty} \frac{V_h}{hV_1} \cos \varphi_h \right)^{\sigma} \quad (2.20)$$

$$P_F = P_{F-0} \left[1 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2 C_{en} \right] \quad (2.21)$$

Sendo h a ordem harmônica; V_h a tensão do h -ésimo harmônico; V_1 a tensão da fundamental; φ_h o ângulo de fase do h -ésimo harmônico de tensão; e σ o coeficiente de Steimmetz.

Na expressão (2.21) o coeficiente C_{en} depende da espessura do núcleo (Δ), da permeabilidade magnética do núcleo (μ), da condutividade elétrica do núcleo (γ) e da freqüência da componente fundamental (f). O valor de C_{en} é calculado usando-se as expressões de (2.22) a (2.24).

$$C_{en} = 1 - 0,0017 \xi^{3,61} \quad \text{para } \xi < 3,6 \quad (2.22)$$

$$C_{en} = \frac{3}{\xi} \quad \text{para } \xi > 3,6 \quad (2.23)$$

$$\xi = \Delta \sqrt{\pi \mu \gamma h f} \quad (2.24)$$

Vale ressaltar que, mesmo para sistemas de distribuição, os valores de distorção de tensão não costumam ser muito elevados. Valores em torno de 1 a 5% são comumente encontrados. E, uma vez que a variação das perdas em vazio depende diretamente de quanto a tensão está distorcida, pode-se presumir que as possíveis alterações das perdas em vazio frente à distorção de tensão não serão tão relevantes quanto as possíveis alterações das perdas em carga frente à distorção de corrente, como será visto adiante.

b) Efeitos da Distorção de Corrente nas Perdas em Carga

As perdas provocadas pela dissipação de energia nas resistências dos enrolamentos, bem como as perdas conseqüentes do fluxo de dispersão, são sensíveis às variações da corrente de carga. Desta maneira se a corrente de carga for distorcida, mantendo-se o valor da fundamental, haverá um acréscimo no seu valor eficaz devido aos harmônicos, provocando assim um aumento nas perdas Joule $(r \cdot I_{RMS}^2)$. Com a presença de componentes de frequências maiores que a da fundamental, outro efeito que se torna relevante é o efeito pelicular, no qual ocorre uma diminuição da área condutora do condutor e por conseqüência um aumento da resistência do mesmo, implicando em uma maior dissipação de energia nos enrolamentos.

Outra perda que não pode ser desprezada é aquela causada pelas correntes parasitas nos enrolamentos, a qual é acrescida com o aumento da frequência. Esta perda é proporcional ao quadrado da corrente de carga e ao quadrado da frequência, como mostra a expressão (2.25), conforme IEEE (1998).

$$P_{CP} = P_{CP-0} \cdot \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} = P_{CP-0} \cdot F_{HL} \quad (2.25)$$

Onde F_{HL} é o fator de perda harmônica para correntes parasitas nos enrolamentos, sendo h a ordem harmônica. O aumento destas perdas pode causar um aumento excessivo da temperatura dos enrolamentos.

Por fim, as perdas por fluxo de dispersão em outros componentes (grampos, parafusos, carcaça, etc.) apresentam também um acréscimo proporcional à presença de conteúdo harmônico na corrente de carga. A relação entre estas perdas e as harmônicas é mostrada na equação (2.26).

$$P_{OFD} = P_{OFD-0} \cdot \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} = P_{OFD-0} \cdot F_{HL-OFD} \quad (2.26)$$

Onde, F_{HL-OFD} é o fator de perda harmônica por fluxo de dispersão em outros componentes.

Como se pode observar pelo expoente de h , o acréscimo das perdas em virtude do aumento do conteúdo harmônico é mais expressivo nas perdas por correntes parasitas nos enrolamentos do que nas perdas por fluxo de dispersão em outros componentes. Com esse aumento de conteúdo harmônico haverá a necessidade de uma redução no valor máximo da corrente do transformador, devido ao aumento da temperatura nos enrolamentos. Esta redução pode ser avaliada pela equação (2.27), conforme IEEE (1998).

$$I_{MAXu} = \sqrt{\frac{P_{C-0u}}{1 + F_{HL} P_{CP-0u}}} \quad (2.27)$$

Complementarmente pode ser obtida, através da equação (2.28), a redução de potência aparente nominal (RAPR – Reduction in Apparent Power Rating) do transformador.

$$RAPR = 1 - \left(\frac{V_{2RMS}^{nao-linear}}{V_{2RMS}^{nominal}} \right) I_{MAXu} \quad (2.28)$$

Onde $V_{2RMS}^{nao-linear}$ é a tensão eficaz no secundário do transformador considerando a presença de harmônicos e $V_{2RMS}^{nominal}$ é a tensão nominal eficaz também no secundário do transformador.

Um estudo (Galvão e Parentoni, 2004) foi realizado para verificar o comportamento das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos, das perdas por fluxo de dispersão nos outros componentes, bem como da corrente máxima admissível do transformador em função da distorção harmônica total de corrente. Como resultado de uma aplicação teórica, foram obtidas as curvas mostradas nas Figura 2.19, Figura 2.20 e Figura 2.21 para um transformador a seco delta/estrela (2500 [kVA] - 13,8/0,48 [kV]).

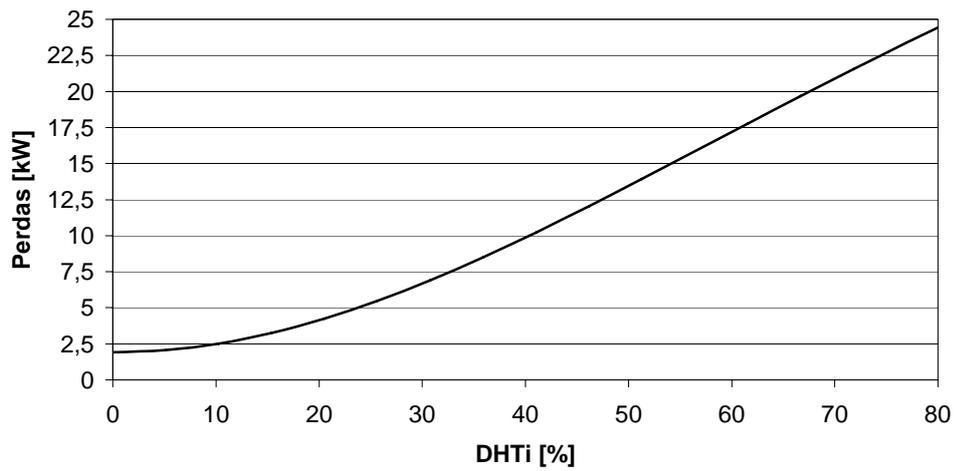


Figura 2.19 – Comportamento das Perdas por Correntes Parasitas nos Enrolamentos.

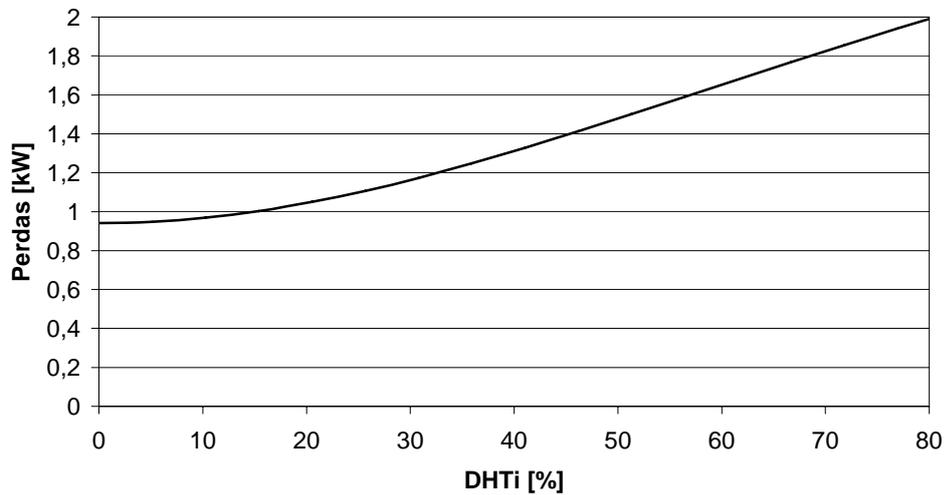


Figura 2.20 – Comportamento das Perdas por Fluxo de Dispersão nos Outros Componentes.

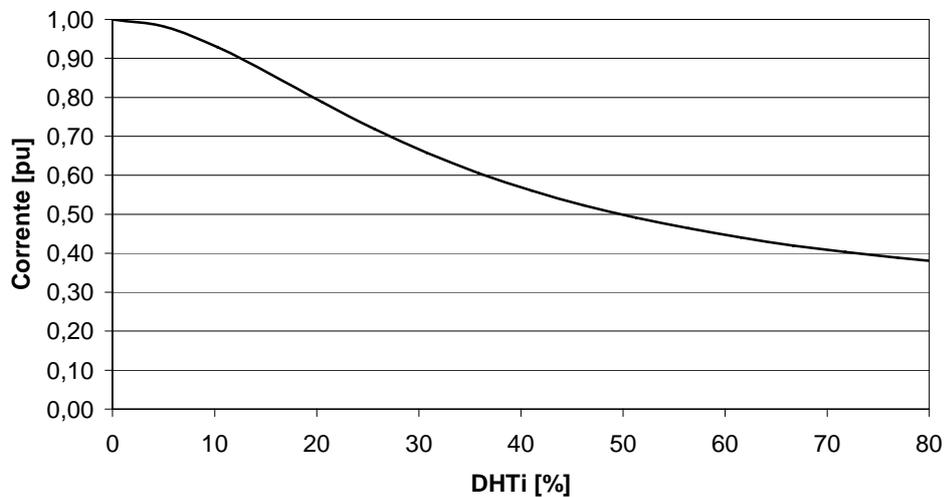


Figura 2.21 – Comportamento da Máxima Corrente do Transformador.

Como podem ser notadas na Figura 2.19 e na Figura 2.20, as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos crescem em maior proporção do que as perdas por fluxo de dispersão nos outros componentes. Para que seja mantida a condição de perdas nominais do transformador, a Figura 2.21 mostra que, teoricamente, deverá haver um decréscimo da corrente máxima do transformador proporcional ao aumento de distorção de corrente. A título de exemplo, pode-se observar que para uma distorção harmônica total de corrente de aproximadamente 50%, a corrente máxima do transformador deveria ser 0,5 pu. Em outras palavras, a potência máxima (kVA) que o transformador será capaz de suprir, para que as perdas não sejam maiores que as nominais, é aproximadamente metade da sua potência nominal, sendo mantida a tensão constante. É importante observar que tal resultado é válido apenas para o transformador em questão, cujos dados foram utilizados para os cálculos. As características do transformador, bem como a distorção harmônica da corrente que circula pelo mesmo influenciam diretamente na magnitude da máxima corrente admissível.

No mesmo trabalho, em laboratório, foi também ensaiado um transformador delta/estrela (2 [kVA] - 180/220 [V]), com o objetivo de analisar o comportamento de suas perdas em função da não linearidade da carga. Primeiramente buscou-se obter o valor das perdas nominais, através de medições em uma situação com um carregamento de 2 [kW] puramente resistivo (lâmpadas incandescentes). Desta maneira, o resultado obtido para as perdas nominais totais do transformador foi 192 [W]. De posse desse resultado objetivou-se atingir este valor de perdas nominais totais com uma carga não linear, carga esta que foi composta por computadores e lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs). A composição harmônica desta carga, bem como os resultados de potência da carga e de perdas totais do transformador são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resultados da Medição do Transformador de 2 [kVA]

Valores	Fase A	Fase B	Fase C
I_1 [A]	2,991	5,438	5,515
I_3 [A]	2,022	2,404	1,930
I_5 [A]	0,884	0,495	0,615
I_7 [A]	0,092	0,672	0,389
I_9 [A]	0,156	0,311	0,163
I_{11} [A]	0,106	0,191	0,127
I_{13} [A]	0,007	0,049	0,113
I_{15} [A]	0,064	0,021	0,085
DHTi [%]	74,19	47,36	37,73
Potência	1602 [W]		
Perdas	190 [W]		

Pode-se observar que para essa situação de carga, o valor das perdas nominais foi atingido, porém tem-se agora uma potência ativa consumida igual a 1602 [W]. Em outras palavras, com a não linearidade de carga apresentada na Tabela 2.4, o transformador é capaz de suprir uma potência igual a 80,1% de sua potência nominal sem ultrapassar suas perdas nominais.

De acordo com os resultados do estudo teórico mostrado pela Figura 2.21, a potência que este transformador poderia suprir, nesta condição de distorção de corrente, seria menor que a obtida pelos ensaios. Esta discrepância pode ser justificada pelo fato de que, além dos transformadores apresentarem características diferentes, há diferenças entre as composições harmônicas das cargas nas duas situações. Na situação do item a) ocorre um aparecimento mais significativo de harmônicas de ordens mais elevadas (11^a, 13^a, etc.) do que na situação referente à Tabela 2.4. Outra análise que pode ser feita consiste em calcular a máxima corrente admissível pelo procedimento teórico que gerou a Figura 2.21 utilizando a mesma composição harmônica das medições. Assim, obtém-se um valor para a corrente máxima admissível de aproximadamente 70%.

Complementarmente, foi realizado um cálculo para a obtenção da máxima corrente admissível no transformador a ser utilizado nas medições laboratoriais dessa pesquisa. Tal cálculo é realizado como um caso exemplo, conforme descrito no item 2.4.

2.4 Caso Exemplo

Pode-se aplicar o desenvolvimento teórico apresentado no item 2.3 a um transformador existente no Laboratório de Eletrotécnica da Universidade Federal de Itajubá (Figura 2.22 – o mesmo a ser utilizado quando das medições laboratoriais), o qual tem por características: conexão delta-estrela; potência nominal 2 kVA; tensões 180-220 V; $Z = 5,35\%$.

Através de ensaios convencionais de curto-circuito obteve-se que o valor das perdas à plena carga e sob condições senoidais de operação é igual a 190 W.

Complementarmente, com base em IEEE (1998), podem-se obter as parcelas de perdas por correntes parasitas e por fluxo de dispersão, correspondentes as perdas totais:

$$P_{CP-0} = 21,67 \text{ W}$$

$$P_{OFD-0} = 10,68 \text{ W}$$

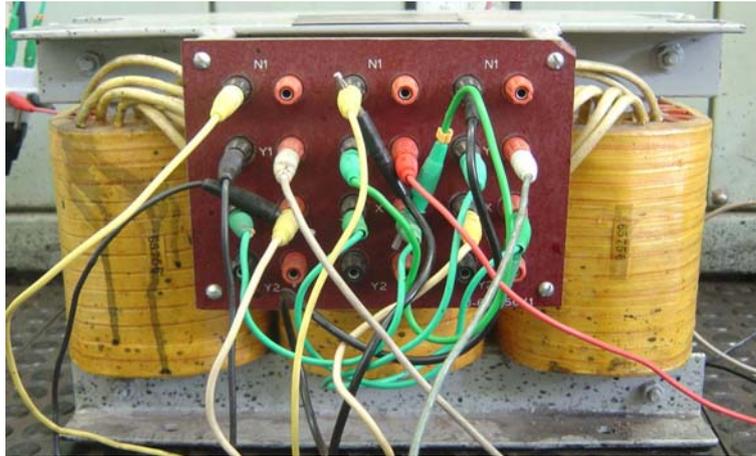


Figura 2.22 – Transformador sob análise.

Para se obter o acréscimo das perdas devido à circulação de correntes não senoidais, inicialmente define-se, de acordo com a Tabela 2.5, uma composição harmônica padrão. Observa-se, aqui, que tal composição harmônica é idêntica à ensaiada em laboratório, cujas análises serão abordadas nos capítulos 5 e 6.

Tabela 2.5 – Composição harmônica da corrente de carga medida em laboratório.

Harmônico	1	5	7	11	13		DHT
% Fund.	100	20	15	7,8	8,3		27,5 %

Através das expressões (2.25) e (2.26), obtém-se as novas perdas quando da circulação de tal corrente distorcida:

$$P_{CP} = 100,80 \text{ W}$$

$$P_{OFD} = 13,37 \text{ W}$$

De posse desses valores, é possível calcular, de acordo com a expressão (2.27), a máxima corrente admissível:

$$I_{MAXu} = 0,8525$$

Por fim, pode-se obter a redução de potência do transformador.

$$RAPR = 1 - \left(\frac{221,29}{220} \right) 0,8525 = 0,1425$$

Tal resultado significa que, teoricamente, com a corrente de carga distorcida, de acordo com a composição harmônica dada na Tabela 2.5, a capacidade do transformador é reduzida de

aproximadamente 14,25 % da sua capacidade sob corrente de carga senoidal. Esse resultado será comparado, mais à frente, com os obtidos a partir de ensaios laboratoriais.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma coletânea de trabalhos publicados acerca da influência do efeito pelicular em sistemas elétricos, bem como o acréscimo de perdas em equipamentos elétricos devido à circulação de correntes distorcidas.

Como observado, a carência de trabalhos que utilizam uma abordagem prática dos temas supracitados torna relevante o desenvolvimento da presente tese.

Capítulo 3

Concepção dos Sistemas de Medição

*“Aprender com a experiência dos outros é
menos penoso do que aprender com a
própria.”*

José Paramago

3.1 Considerações Iniciais

Quando da concepção dos sistemas de medição não se objetivou a obtenção exata dos valores das perdas em equipamentos elétricos, mas sim da variação das perdas quando da submissão dos mesmos a variadas condições: desde a linearidade até algumas situações de distorção.

Para tanto, antes da definição dos sistemas de medição propriamente dita, inicialmente, procurou-se sugestões na literatura, objetivando a melhor configuração possível para a medição de temperatura em equipamentos elétricos. Dessa maneira, em seguida, foram compostos os dois sistemas de medição utilizados nesse trabalho. Nos itens subsequentes é feita uma descrição acerca destes acontecimentos.

3.2 Sugestões da Literatura

Imre (1999) apresentou diversos métodos para a medição das perdas elétricas, bem como suas respectivas vantagens e desvantagens.

O primeiro método citado consiste na conexão de um circuito LC (indutor e capacitor) série. Sabendo-se a tensão no capacitor, podem-se calcular as perdas, quando de seu descarregamento, através da medição da tensão e da corrente no indutor.

Outro modo de se medir a potência perdida é utilizando um wattímetro. Porém, há a dificuldade de se obter wattímetros para medição envolvendo altas frequências.

No terceiro método exposto, utiliza-se um osciloscópio, onde em um canal, faz-se o registro dos valores de tensão entre os terminais desejados e, em outro canal, o registro dos valores de corrente. Para se obter a potência dissipada, basta multiplicar os valores instantâneos da tensão pela corrente. O erro cometido neste tipo de medição é devido à taxa de amostragem do osciloscópio.

O quarto método explorado parte do princípio de utilização de um fluido que passe pelo equipamento desejado e, através da medição da variação da temperatura do líquido, pode-se calcular a dissipação de calor no mesmo. Para isso, basta ter a capacidade térmica e a massa do fluido conhecidas. Vale observar que este método é preciso se as transferências de calor por radiação e convecção forem desprezadas. O autor acaba por concluir que este método é mais aplicável para elevados valores de potência dissipada.

Por fim, no último método apresentado, o autor cita que se pode obter as perdas colocando-se o equipamento elétrico em um local fechado e isolado termicamente. Este

equipamento fica em contato com um fluido refrigerante, que circula com o objetivo de manter a distribuição de calor uniforme. A temperatura do equipamento e do fluido é medida através de termopares. Uma desvantagem desse método é que, dependendo do coeficiente de temperatura do fluido, pode-se levar um bom tempo para que a condição inicial seja restabelecida. Outro problema é que, o material utilizado pode sofrer influência da umidade.

Durante a pesquisa de sugestões para a concepção do sistema de medição, foram consultadas diversas outras publicações, no entanto, os métodos utilizados são similares ou idênticos aos já expostos.

Dessa maneira, para este trabalho, inicialmente, dentre os cinco métodos de medição explicitados, optou-se pela utilização do último e, como fluido, a priori, foi escolhido o ar, no entanto objetiva-se usar outros tipos de fluido, tais como água ou óleo mineral.

Aliando o conhecimento trazido pelos trabalhos já realizados com a expectativa de resultado acerca da presente tese surgiram dois sistemas de medição, cujas concepções são descritas nos itens subseqüentes.

3.3 Sistema de Medição 1

O primeiro sistema de medição foi concebido para ser extremamente simples, de maneira a facilitar a análise de seus resultados, ou seja, objetivou-se minimizar a influência de fatores alheios aos de interesse. O diagrama esquemático concebido para o sistema 1 é mostrado na Figura 3.1.

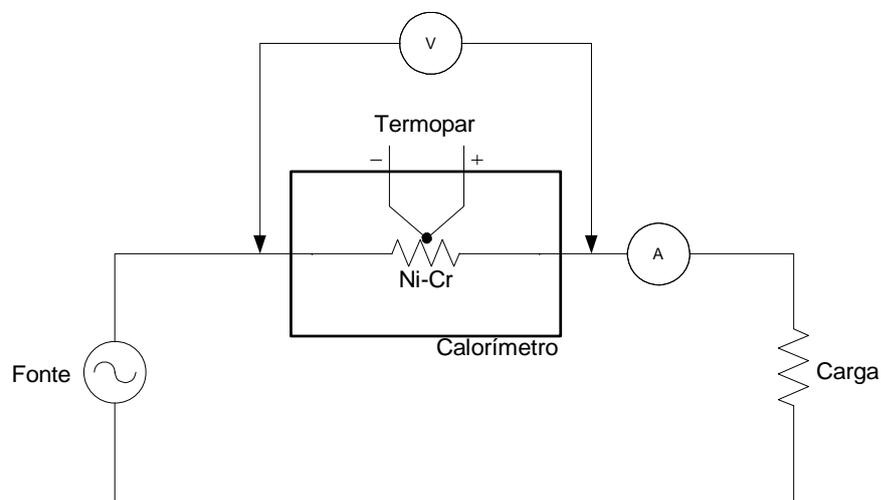


Figura 3.1 – Diagrama Esquemático do Sistema 1.

A seguir são especificados os equipamentos constituintes desse sistema de medição:

- Duas fontes de tensão destinadas à geração de sinais arbitrários. A Tabela 3.1 mostra algumas especificações técnicas de cada uma das fontes, a primeira do fabricante Pacific e a segunda do fabricante California. Ademais a Figura 3.2 traz uma foto de tais equipamentos.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas das fontes de tensão utilizadas.

Fonte	PACIFIC	CALIFORNIA
Potência Nominal	4500 VA	6000 VA
Tensão Nominal FN/FF	135/270 V	135/270 V
Corrente Nominal por Fase	12 A	14,8 A
Exatidão de Tensão	± 50 mV	± 135 mV
Faixa de Frequência	20 a 5000 Hz	17 a 5000 Hz
Exatidão de Frequência	$\pm 0,01$ %	$\pm 0,001$ %



Figura 3.2 – Fontes Pacific e California.

- Fonte de alimentação com saída em corrente constante. Equipamento: Caixa de calibração de relés da marca Omicron (vide Figura 3.3). São características técnicas desse equipamento: Potência nominal de 480 VA; Faixa de operação de 0 a 12,5 A; Resolução de 500 μ A; Erro típico de 0,015% da leitura + 0,005% da faixa de operação.



Figura 3.3 – Caixa Omicron.

- Medidores MARH21 (fabricante RMS - Figura 3.4) e PM3000 (fabricante Voltech - Figura 3.5), destinados ao registro de valores de tensão, corrente e temperatura. As características técnicas são mostradas na Tabela 3.2.

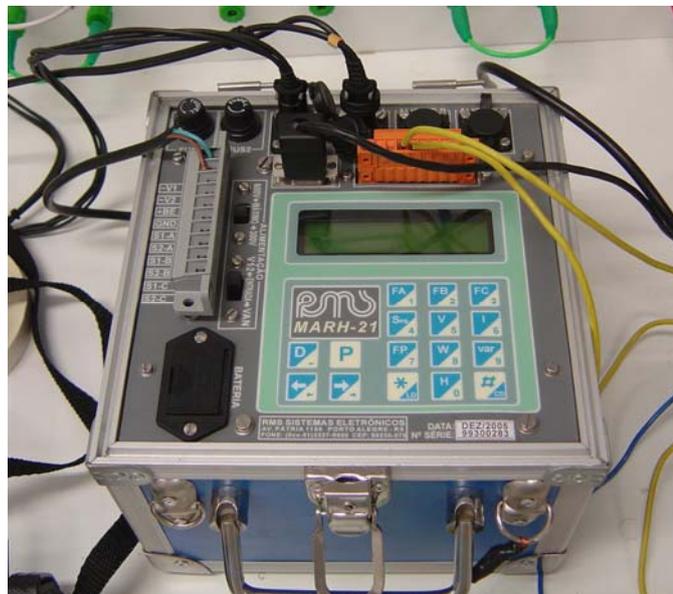


Figura 3.4 – Medidor MARH21 da RMS.

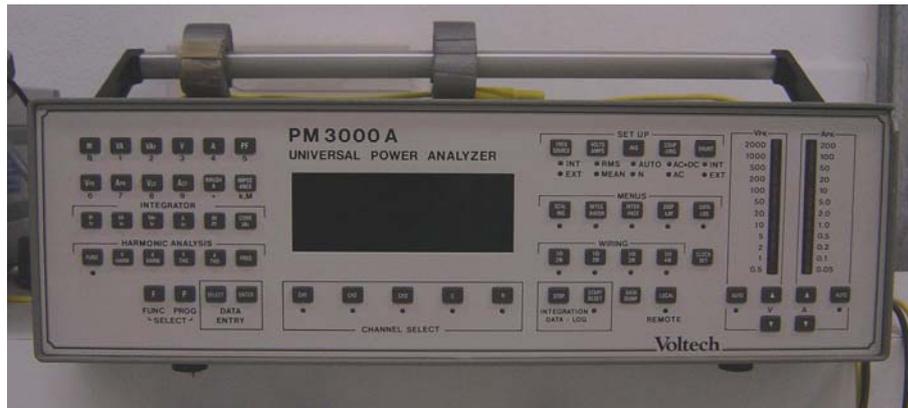


Figura 3.5 – Medidor PM300 da Voltech.

Tabela 3.2 – Características técnicas dos medidores MARH21 e PM3000.

Medidor	MARH21	PM3000
Faixa de Tensão	0 – 600 V	0,5 a 1400 V
Exatidão de Tensão	0,001 V até 9,99 V 0,01 V até 99,99 V 0,1 V até 600 V	DC: $\pm 0,1\% \pm 1 \text{ mV}$ 4,5 a 450 Hz: $\pm 0,05\% \pm 0,5 \text{ mV}$ 0,1 a 500 kHz: $\pm 0,1\% \pm 0,5 \text{ mV}$
Faixa de Corrente	0 – 11 A	0 – 30 A
Exatidão de Corrente	0,001 A até 9,99 A 0,01 A até 99,99 A	DC: $\pm 0,1\% \pm 200 \mu\text{A}$ 4,5 a 450 Hz: $\pm 0,05\% \pm 100 \mu\text{A}$ 0,1 a 500 kHz: $\pm 0,1\% \pm 100 \mu\text{A}$
Faixa de Frequência	0 a 3660 Hz	0 a 500 kHz

- Conjunto para a medição de temperatura constituído de dois termopares (um destinado a medir a temperatura no resistor e outro no fluido em contato com o mesmo) e um resistor de níquel-cromo (Ni-Cr) disposto uniformemente dentro de um calorímetro (vide Figura 3.6). Vale observar que podem ser usados diversos fluidos de contato com o resistor. Inicialmente foi utilizado o próprio ar, no entanto pode-se, dependendo da necessidade, substituí-lo por água destilada ou até mesmo óleo mineral.

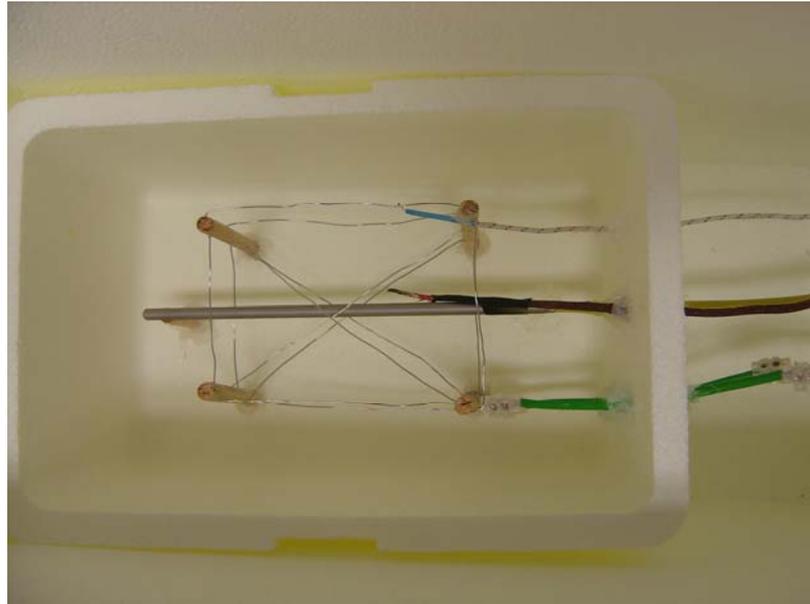


Figura 3.6 – Resistor de Ni-Cr.

- Sistema térmico (calorímetro), composto por uma caixa de isopor devidamente fechada, destinado à melhora da isolamento térmica do conjunto supracitado (vide Figura 3.7);

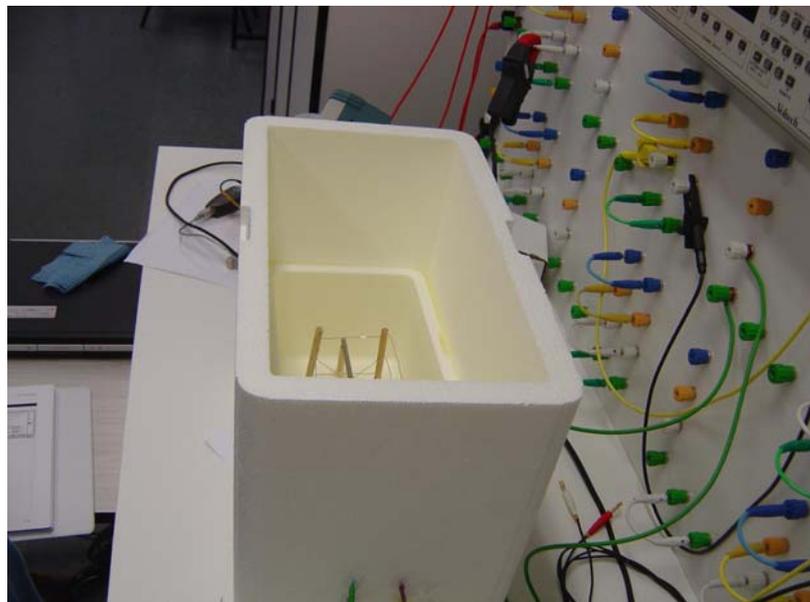


Figura 3.7 – Calorímetro utilizado.

- Transmissor de temperatura com saída analógica de 4 a 20 mA, destinado à adequação do sinal do termopar à sensibilidade do medidor RMS (vide Figura 3.8);

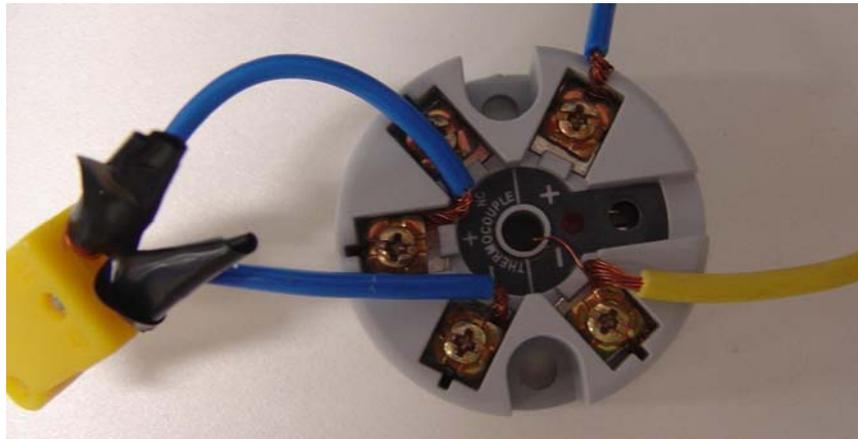


Figura 3.8 – Transmissor de temperatura.

- Carga formada por um resistor também da liga níquel-cromo (vide Figura 3.9). Vale observar que o objetivo do resistor de carga é a limitação da corrente a circular no circuito. É possível, para tal fim, ajustar o resistor de maneira a ter-se a corrente desejada circulando no “resistor alvo”, dentro do calorímetro.

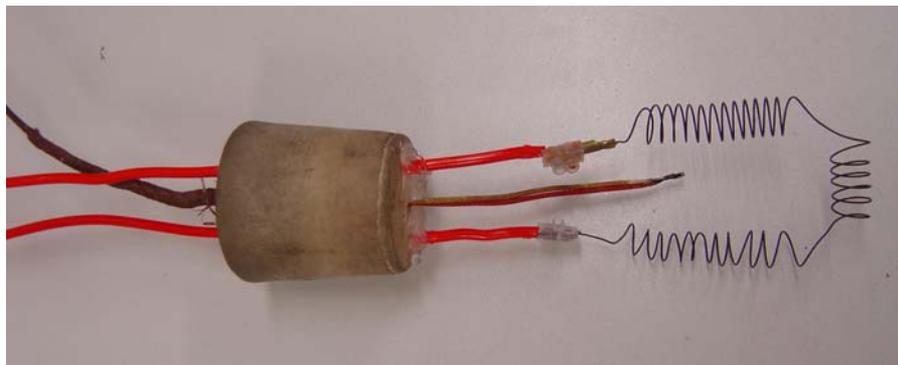


Figura 3.9 – Carga.

Realizada a montagem e conexão de todos os equipamentos listados acima, o sistema de medição completo, montado em bancada laboratorial, correspondente ao diagrama esquemático da Figura 3.1, pode ser visualizado na Figura 3.10.

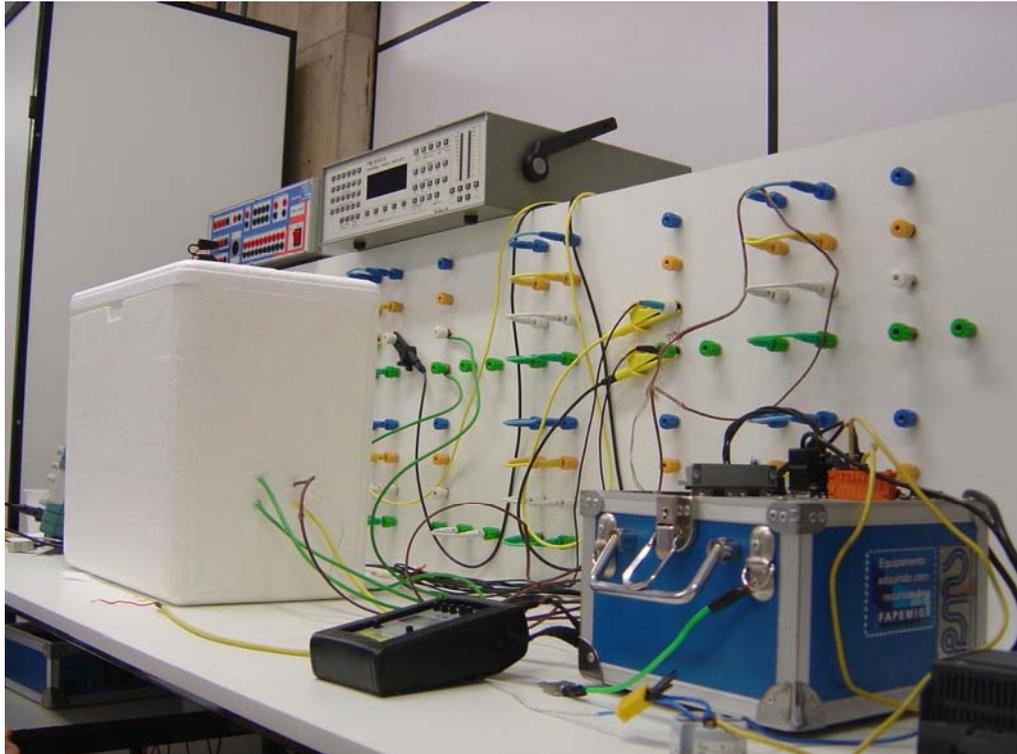


Figura 3.10 – Sistema completo.

3.4 Sistema de Medição 2

Uma vez que o sistema 1 foi montado e a medida que as experiências com o mesmo foram sendo realizadas e, aliando a isso, a busca pelo resultado esperado, a ideologia de montagem do sistema 2 foi surgindo naturalmente. Foi idealizado um sistema no qual um transformador alimentasse um motor, no entanto necessitava-se de cargas para o motor. A princípio, resolveu-se utilizar um gerador de corrente contínua, como pode ser compreendido através do diagrama esquemático da Figura 3.11.

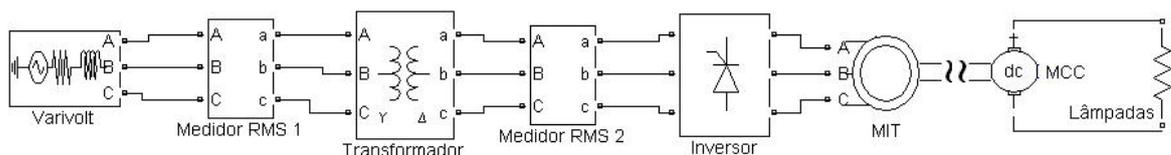


Figura 3.11 – Diagrama elétrico do sistema 2.

Todavia, existe no laboratório de eletrotécnica da UNIFEI uma bancada equipada com um inversor, um motor de indução trifásico e um sistema de freio magnético. Optou-se,

por praticidade, utilizar essa. Assim sendo, o diagrama esquemático, realmente montado em laboratório pode ser visualizado na Figura 3.12.

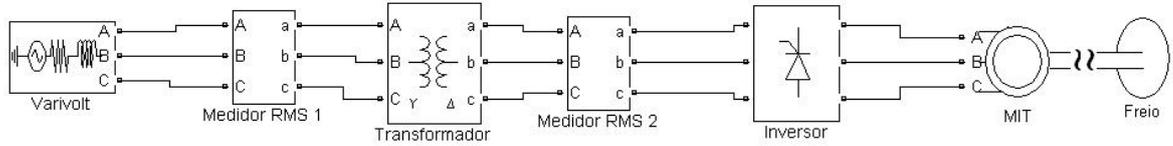


Figura 3.12 – Diagrama elétrico montado.

Nota-se inicialmente que a tensão, proveniente da rede, é controlada através de um Varivolt de 4 kVA, cuja foto é mostrada na Figura 3.13. Este controle se faz necessário devido ao fato de o transformador exigir uma tensão de entrada de 180 Volts entre fase e fase, uma vez que a tensão fornecida pela bancada é de 220 Volts.



Figura 3.13 – Varivolt.

Regula-se a tensão na saída do Varivolt em 180 V para possibilitar a alimentação do transformador com tensão nominal. Dessa forma obtém-se na saída do mesmo a tensão de 220 V. Ademais a potência nominal do transformador é 2 kVA e sua impedância é de 5,35 %. A Figura 3.14 mostra a foto do transformador em questão.

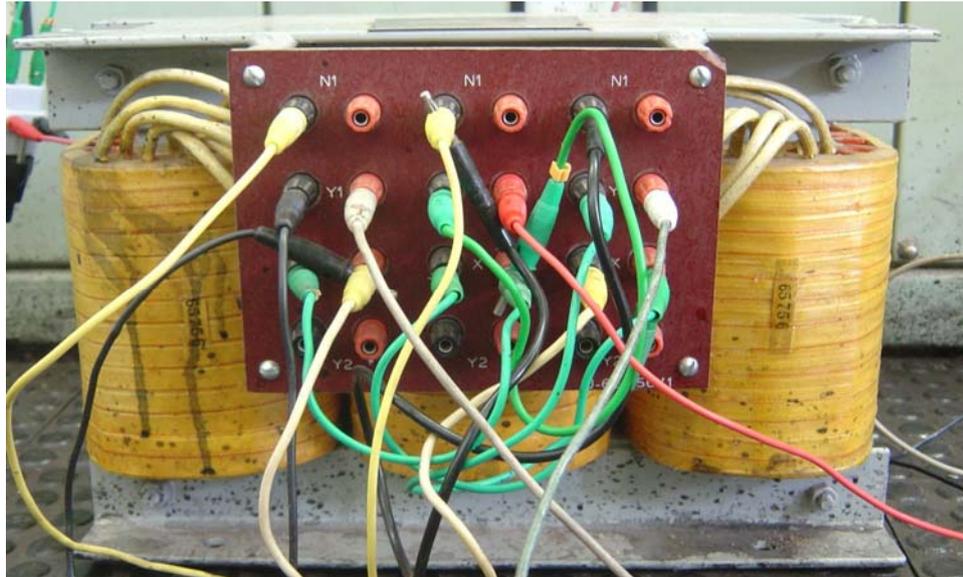


Figura 3.14 – Transformador.

No caso dessa medição, como necessita-se de uma tensão fase-fase de 220 V no motor, foi utilizada a conexão delta no primário e a conexão estrela no secundário.

A saída do transformador pode ser conectada ao motor, dependendo da situação a ser ensaiada, de duas formas:

- 1º. Diretamente;
- 2º. Através do inversor de frequência de 3 CV mostrado na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Inversor de frequência.

Assim sendo, seja diretamente conectado ao secundário do transformador, seja conectado ao inversor de frequência, o motor de indução trifásico (MIT) é acionado. Este, mostrado na Figura 3.16, possui uma potência nominal de 3 CV e tensão de alimentação de 220 V.



Figura 3.16 – MIT.

Ao eixo do MIT é acoplado um freio de Foucault, especialmente desenvolvido para possibilitar o carregamento da máquina. Vide Figura 3.17.

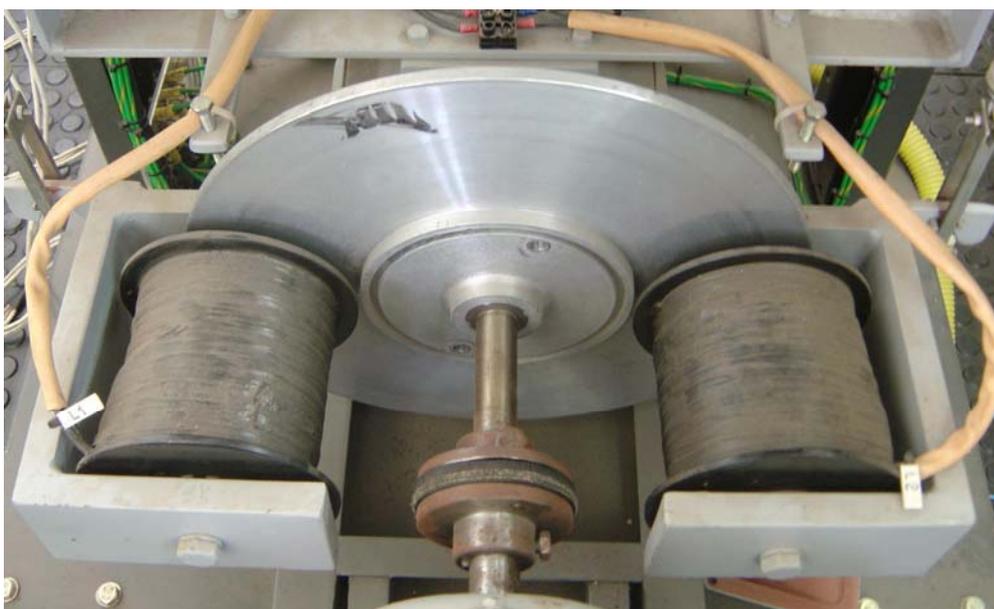


Figura 3.17 – Freio de Foucault acoplado ao eixo do MIT.

Dessa maneira, o conjunto de carga completo (MIT + freio + inversor de frequência) é mostrado na Figura 3.18, na qual se visualiza também toda a bancada controladora desses elementos. Observa-se que, através da mesma, pode-se inserir a carga desejada no motor, limitando a corrente máxima no mesmo em 9 [A].

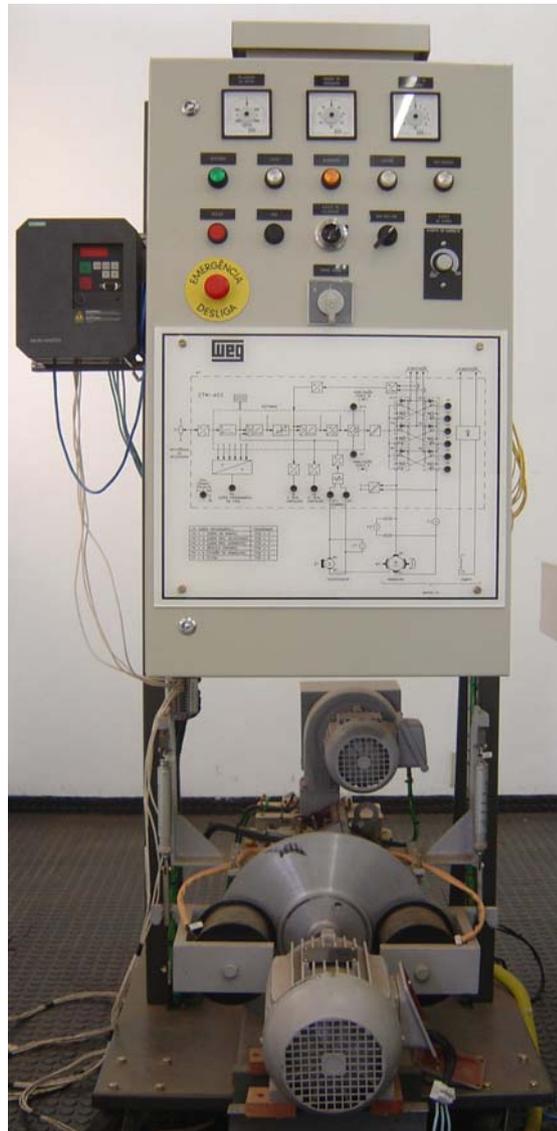


Figura 3.18 – Conjunto de carga.

Para a execução da medição de temperatura, foi acoplado um termopar, como mostra a Figura 3.19, do lado interno do enrolamento do transformador a seco dentro de um dos canais de ventilação.



Figura 3.19 – Inserção do termopar.

Como é conhecido das medições com o sistema 1, a saída do termopar é ligada ao transmissor de temperatura (Figura 3.8), que é conectado ao medidor RMS (Figura 3.4). Assim sendo, para o registro adicional de tensões e correntes foram conectados dois desses medidores, um de cada lado do transformador, da maneira mostrada na Figura 3.20.

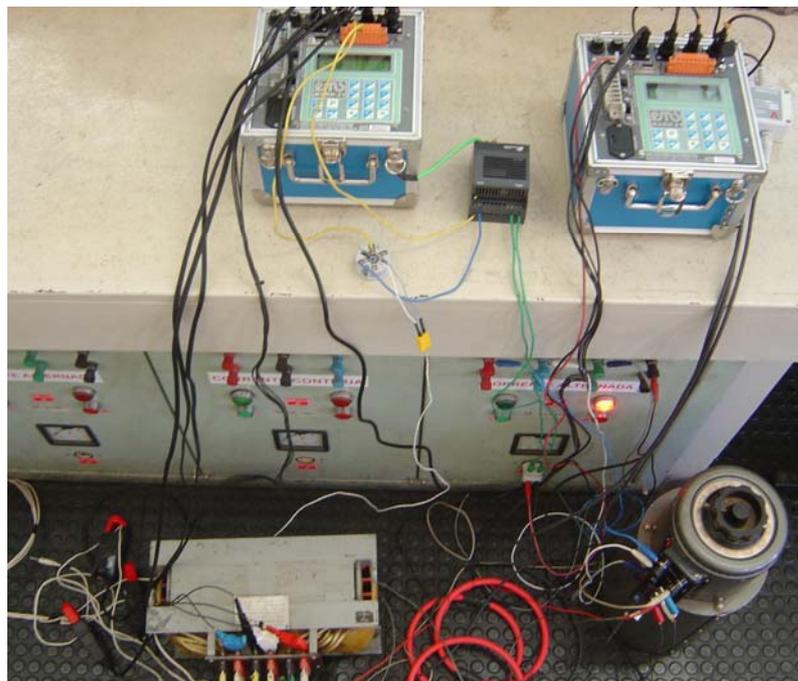


Figura 3.20 – Medidores no sistema 2.

Finalmente, o sistema de medição 2, completamente montado em laboratório, pode ser observado na Figura 3.21.



Figura 3.21 – Sistema 2 montado.

3.5 Considerações Finais

Uma vez apresentados os sistemas de medição pôde-se partir para as medições propriamente ditas. Além dessas, fez-se também uma série de simulações, como descreve o capítulo 4, baseadas nas topologias apresentadas no presente capítulo, objetivando auxiliar na análise dos resultados.

É importante observar que, devido à mudança do equipamento a ser analisado do sistema 1 (resistor) para o sistema 2 (transformador), optou-se por apresentar os resultados e análises referentes a cada um dos sistemas em capítulos separados (capítulos 5 e 6), diferentemente da sistemática dos capítulos 3 e 4.

Capítulo 4

Simulações Computacionais

*“Logo que, numa inovação,
nos mostram alguma coisa de
antigo, ficamos sossegados.”*

Friedrich Nietzsche

4.1 Considerações Iniciais

As simulações computacionais foram realizadas, no decorrer deste trabalho, com o objetivo de se obterem, além de um melhor entendimento dos fenômenos associados ao tema propriamente dito, dados suficientes para auxiliar na análise comparativa entre os resultados a serem obtidos em laboratório com os esperados, de acordo com a literatura.

Para tanto foram simulados alguns sistemas condizentes com os sistemas de medição descritos no capítulo 3. Inicialmente foi realizada uma comparação entre formas de cálculo de energia dissipada e, em seguida são analisados os resultados de dois dos sistemas simulados: o primeiro tendo como elo um resistor e o segundo, um transformador.

4.2 Comparação entre Formas de Cálculo de Energia Dissipada

Neste item o objetivo é comparar o desempenho de duas formas distintas para o cálculo da energia dissipada em um equipamento elétrico, são elas:

- Cálculo através das amostras de tensão e de corrente;
- Cálculo através da decomposição em séries de Fourier.

O objetivo é validar a utilização teórica das séries de Fourier para o cálculo de potência e/ou energia dissipada em equipamentos elétricos. A validação será feita comparativamente, com base no resultado obtido através do cálculo instantâneo das mesmas grandezas, amostra a amostra.

Dessa maneira, inicialmente será mostrado o procedimento para a obtenção da energia dissipada através do cálculo amostra a amostra. Para tanto foi utilizado um sinal de corrente correspondente à simulação de um retificador de 6 pulsos, como pode ser observado na Figura 4.1. Ademais, a mesma também ilustra o comportamento a cada instante de tempo da potência, definida pelo produto entre a tensão e a corrente.

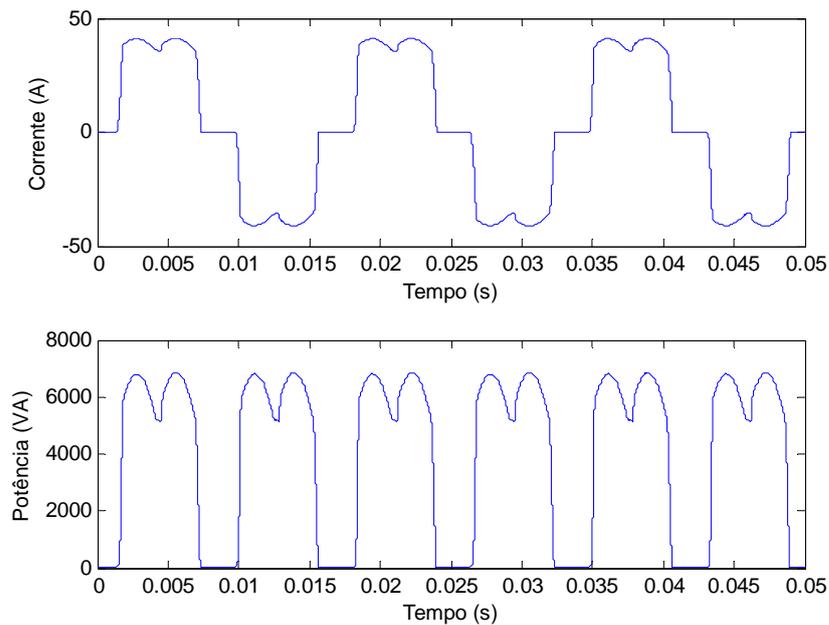


Figura 4.1 – Corrente e potência instantâneas.

De posse da curva da potência instantânea pode-se obter a energia consumida durante o período de um ciclo de 60 Hz de acordo com a expressão (4.1).

$$\varepsilon = \sum_0^T (p \cdot T_s) \quad [W.ciclos] \quad (4.1)$$

Onde T é o período e T_s é o intervalo de amostragem.

Para se obter o valor da energia em kWh basta utilizar a expressão (4.2).

$$\varepsilon = \frac{3,6 \cdot \sum_0^T (p \cdot T_s)}{T} \quad [kWh] \quad (4.2)$$

Calculando dessa maneira, a energia dissipada no período de 1 hora, devida à circulação da corrente em questão é:

$$\varepsilon = 14,601 \quad [kWh]$$

Pode-se ainda, extrair a energia dissipada por cada parte do sinal de corrente. Em outras palavras, como pode ser observado na Figura 4.2, existem três partes bem definidas: subida; pico; e descida.

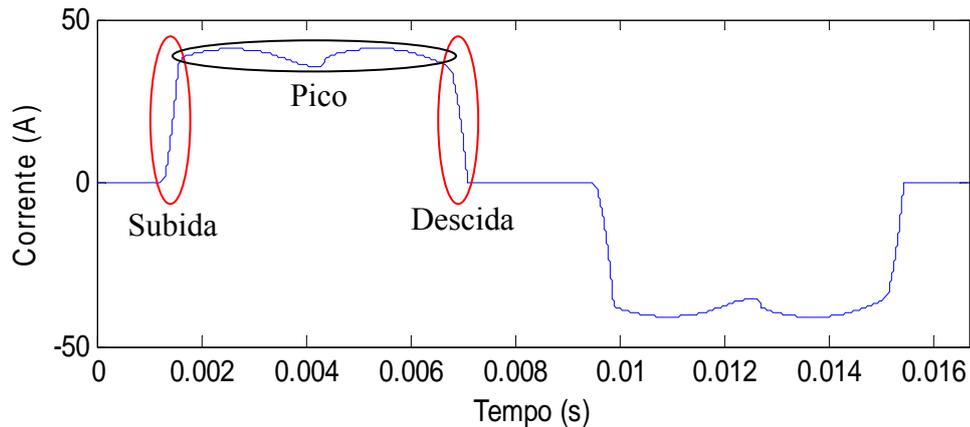


Figura 4.2 – Divisão do sinal de corrente.

Essas três partes, avaliadas a cada meio ciclo, durante o período de uma hora resultam nos seguintes valores de energia dissipada:

$$\varepsilon_{pico} = 13,813 \text{ [kWh]}$$

$$\varepsilon_{sub} = 0,354 \text{ [kWh]}$$

$$\varepsilon_{desc} = 0,439 \text{ [kWh]}$$

De tal maneira que a energia total dissipada é dada pela soma das três parcelas:

$$\varepsilon_{soma} = 14,606 \text{ [kWh]}$$

Nota-se que, como era de se esperar, esse valor é praticamente idêntico ao obtido pela integração da potência como um todo. Também é interessante obter uma relação entre a energia dissipada pelas partes transitórias (subida e descida) e a energia dissipada durante o pico. Tal resultado é expresso a seguir:

$$R = \frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{pico}} = \frac{\varepsilon_{sub} + \varepsilon_{desc}}{\varepsilon_{pico}} = 5,43 \%$$

Neste ponto cabem algumas questões: o cálculo da energia dissipada para a parte transitória deve ser feito da mesma maneira que para a parte do pico? O equipamento elétrico não dissipa, relativamente, mais energia quando submetido a uma condição transitória do que a uma condição praticamente contínua? Nota-se que o tempo do período de transição é bem menor do que o do pico, porém, em contrapartida, a frequência é muito mais elevada. Sabendo disso, a relação obtida acima se justifica, ou deveria ser encontrado um valor superior? Ou inferior?

Perguntas como essas, neste trabalho de doutorado, não serão respondidas através de simulações. Os esforços serão voltados para a análise prática da questão, através de medições laboratoriais.

Paralelamente, foi realizado o cálculo da energia dissipada via séries de Fourier. A princípio, a Figura 4.3 mostra, além do sinal de corrente, o espectro harmônico de amplitude.

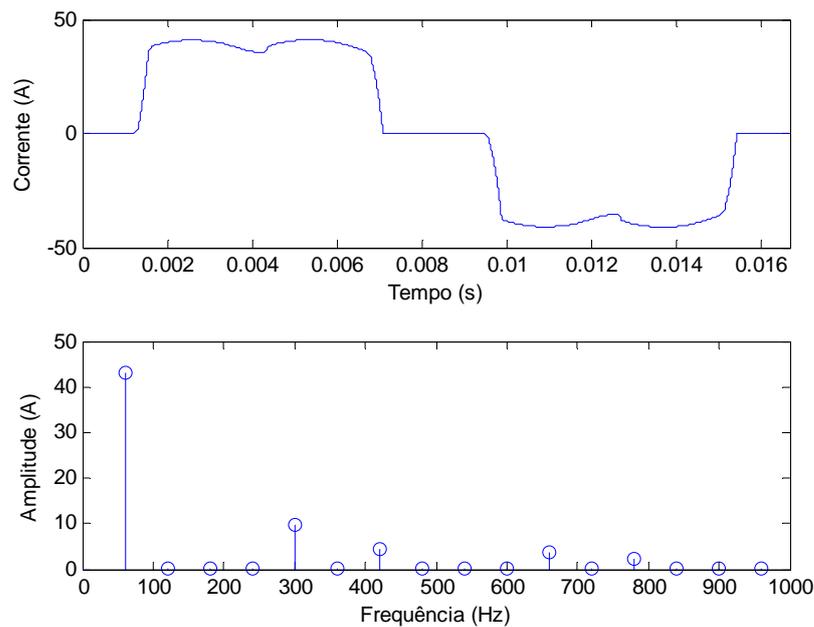


Figura 4.3 – Decomposição do sinal de corrente em série de Fourier.

De posse das magnitudes de cada harmônica pode-se calcular a potência elétrica dissipada pelo sinal de corrente da maneira mostrada na expressão (4.3).

$$P_{diss} = R \cdot I_h^2 \quad (4.3)$$

Onde h é a ordem harmônica e R é a resistência na frequência de 60 Hz. Devido à preferência, neste ponto, por se obter resultados conservadores, não se utilizou uma correção do valor da resistência devido ao efeito pelicular.

De posse do valor da potência, foi calculada a seguinte energia dissipada para o período de um mês:

$$\mathcal{E}_{Fourier} = 14,601 \text{ [kWh]}$$

Nota-se que esse valor de energia é praticamente igual ao obtido pelo cálculo ponto a ponto. Esse fato significa que os resultados obtidos através da simulação são condizentes

com o procedimento teórico. Fica então, neste ponto, a ser respondida nos capítulos 5 e 6, mais uma, talvez a mais relevante desta tese, questão: essa igualdade será mantida quando da análise dos resultados das medições laboratoriais?

4.3 Simulação de Sistemas Comparativos aos de Medição

A título de comparação, foram feitas simulações com base nos dois sistemas de medição desenvolvidos. As simulações objetivam a obtenção da energia dissipada nos seguintes equipamentos elétricos: um resistor para o primeiro sistema e um transformador para o segundo. Nos itens subseqüentes são descritos os sistemas simulados, bem como seus respectivos resultados.

4.3.1 Sistema de Simulação 1 - Dissipação de Energia em Resistor

Inicialmente foi modelado um sistema de simulação objetivando a obtenção da energia dissipada em um resistor situado entre fonte e carga. Para esse sistema, foram simuladas duas situações:

- Sistema com carga linear, mostrado na Figura 4.4;
- Sistema com carga não linear, mostrado na Figura 4.7.

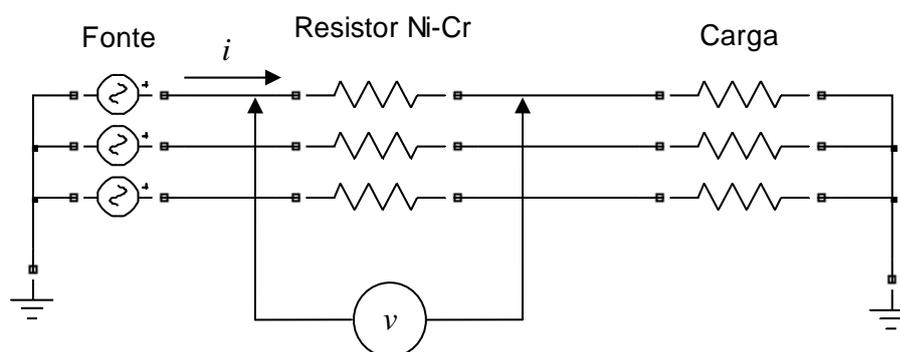


Figura 4.4 – Sistema de simulação 1 – carga linear.

Com a carga linear, através da simulação das grandezas indicadas na Figura 4.4, foram obtidos os sinais de tensão e corrente mostrados na Figura 4.5.

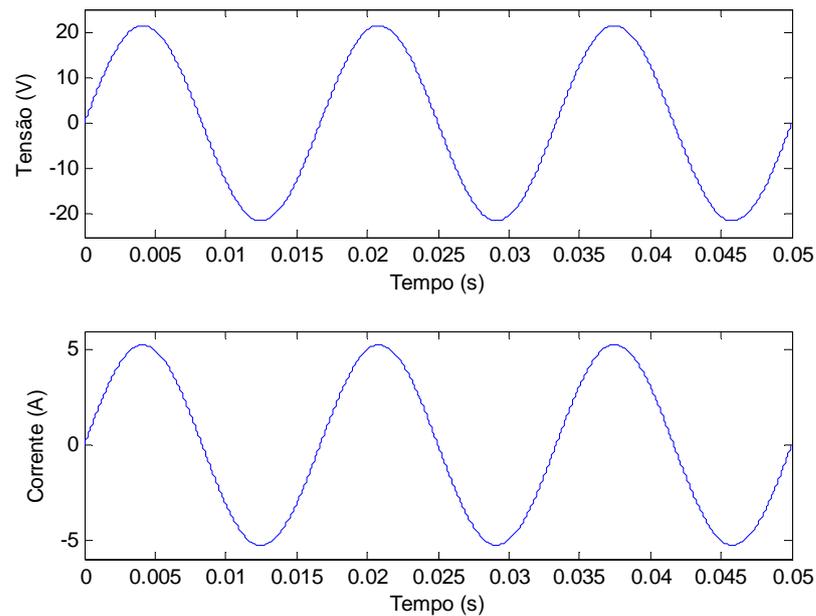


Figura 4.5 – Tensão e corrente para a situação linear.

Observa-se que os sinais são senoidais e, calculando seus valores eficazes obtém-se:

$$V_{EF} = 15,14 \text{ [V]}$$

$$I_{EF} = 3,729 \text{ [A]}$$

Através do produto entre os valores instantâneos de tensão e corrente, obtém-se o comportamento da potência instantânea em função do tempo, como mostrado na Figura 4.6.

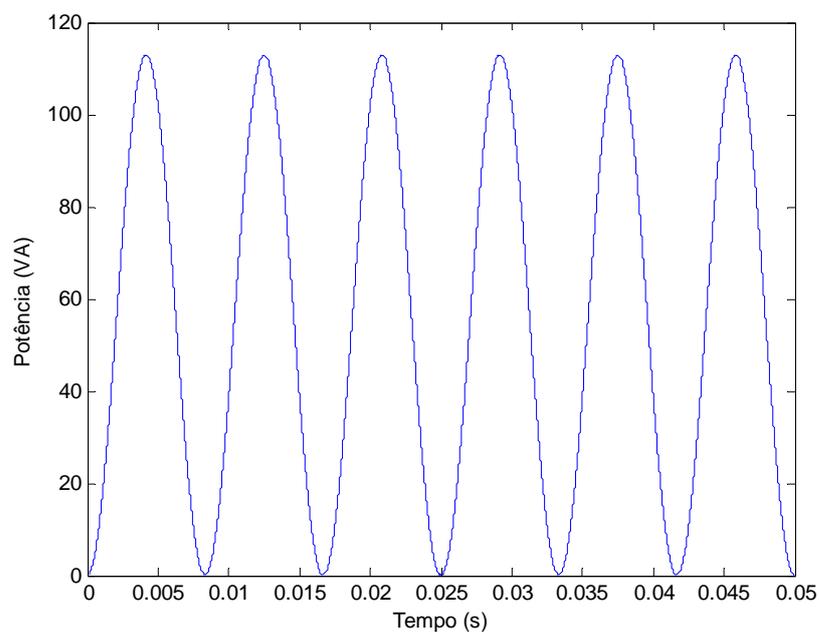


Figura 4.6 – Potência para a situação linear.

Também através da operação realizada amostra a amostra pode-se, multiplicando a potência, a cada instante de tempo, pelo intervalo de amostragem, obter a energia instantânea. Tendo esta, para efeitos de comparação, obtém-se, de acordo com a expressão (4.4), a energia dissipada em *kWh*.

$$\varepsilon = \int p \cdot dt = P_{med} \cdot 3,6 [kWh] \quad (4.4)$$

Calculando o valor desta, para o sistema de simulação em questão, obtém-se:

$$\varepsilon_{total} = 203,267 kWh$$

Também, a título de comparação, é calculada a energia através da utilização de séries de Fourier:

$$\varepsilon_{Fourier} = 203,249 kWh$$

A diferença encontrada nos resultados advindos das duas formas de cálculo para a energia dissipada é oriunda de aproximações necessárias à aplicação da rotina computacional. Comentários a respeito desses resultados serão realizados, comparativamente, ao final do presente item.

Por outro lado, foi realizado o mesmo procedimento para o sistema de simulação 1, porém agora com carga não linear. Vale ressaltar que, como pode ser visualizado na Figura 4.7, foi utilizado, como carga não linear, um conversor de 6 pulsos.

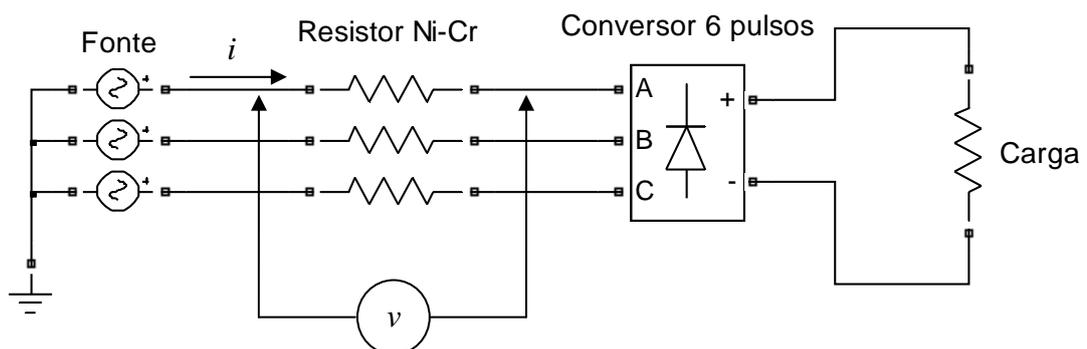


Figura 4.7 – Sistema de simulação 1 – carga não linear.

Os sinais de corrente e da queda de tensão nos terminais do resistor de Ni-Cr, obtidos para a situação de carga não linear, são mostrados na Figura 4.8. Adendo, logo a seguir, são expressos os valores eficazes referentes aos mesmos sinais.

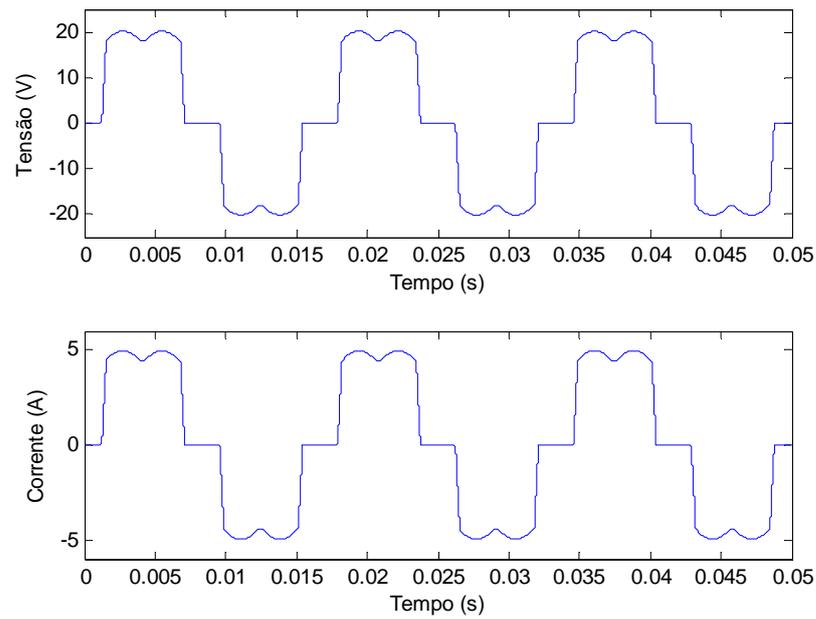


Figura 4.8 – Tensão e corrente para a situação não linear.

$$V_{EF} = 15,14 \text{ [V]}$$

$$I_{EF} = 3,729 \text{ [A]}$$

Analogamente, é mostrada na Figura 4.9, a forma de onda da potência instantânea, obtida através do produto, amostra a amostra, entre tensão e corrente.

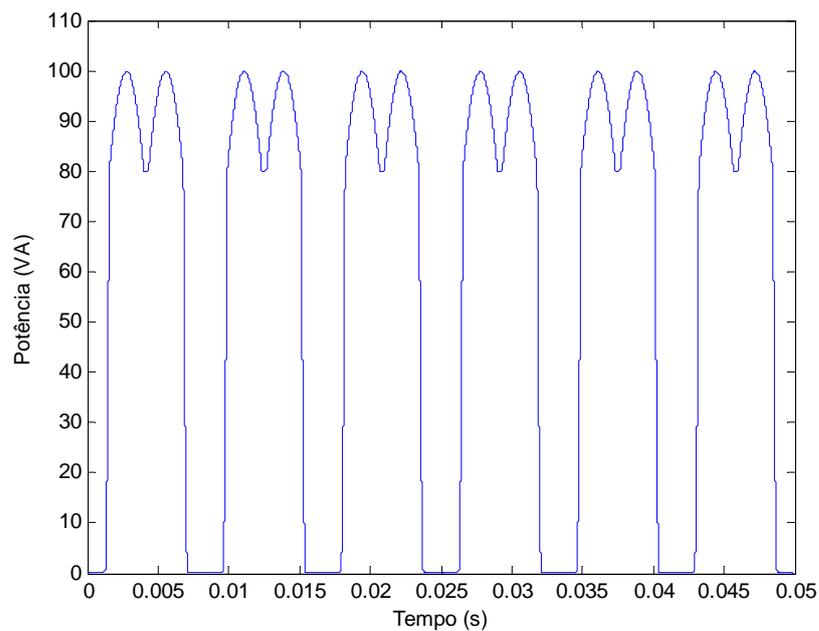


Figura 4.9 – Potência para a situação não linear.

E, por fim, é calculada a energia dissipada no resistor, através do cálculo ponto a ponto e da utilização de séries de Fourier:

$$\mathcal{E}_{total} = 203,069 \text{ kWh}$$

$$\mathcal{E}_{Fourier} = 203,042 \text{ kWh}$$

Observa-se que o valor da energia dissipada para a situação de carregamento não linear é praticamente idêntico ao obtido para a situação linear. Este fato evidencia que, para o modelo simulado, utilizando uma resistência invariante com relação à frequência, não existe diferença, às vistas da energia dissipada no resistor, entre a circulação de uma corrente senoidal e uma distorcida.

Justifica-se, aqui, o esforço na obtenção prática do comportamento da resistência em função do efeito pelicular através de dois questionamentos:

- Mesmo utilizando o mesmo valor eficaz para as correntes, a energia dissipada na prática deve ser maior para a situação não linear frente à linear. Porém, quanto maior?
- A variação da resistência quando da aplicação, isoladamente, de correntes de variadas frequências ocorre da mesma forma que quando da aplicação de correntes transitórias?

Nesse trabalho, objetiva-se responder, de maneira prática, a essas questões, como será apresentado nos capítulos 5 e 6.

4.3.2 Sistema de Simulação 2 - Dissipação em Transformador

Em relação ao sistema 1, o sistema de simulação 2 é constituído substituindo o resistor por um transformador. As mesmas situações de carregamento são avaliadas, como pode ser visto na Figura 4.10, para a carga linear e na Figura 4.13 para a não linear.

Ademais, a respeito desse sistema, o transformador foi modelado em concordância com a carga, de tal maneira que:

- $V_N = 220 : 220 \text{ [V]}$
- Conexões: $Y_g : Y_g$
- $S_N = 1500 \text{ [VA]}$

- $Z = 5 \%$

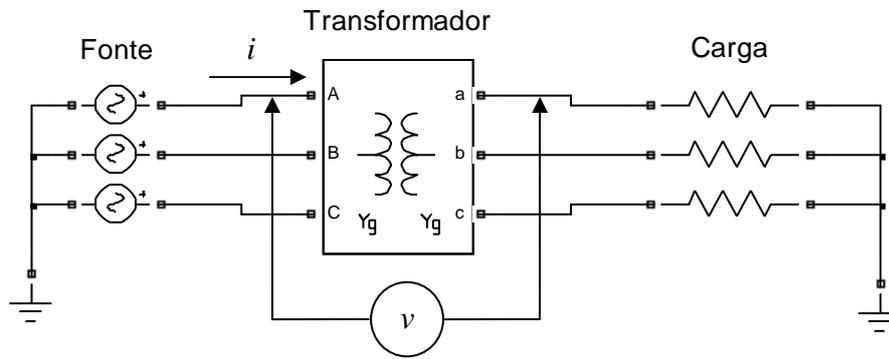


Figura 4.10 – Sistema de simulação 2 – carga linear.

De posse do sistema modelado, utilizou-se o mesmo procedimento descrito no item 4.3.1, no qual, a priori, obtêm-se as formas de onda de tensão e corrente, como mostrado na Figura 4.11.

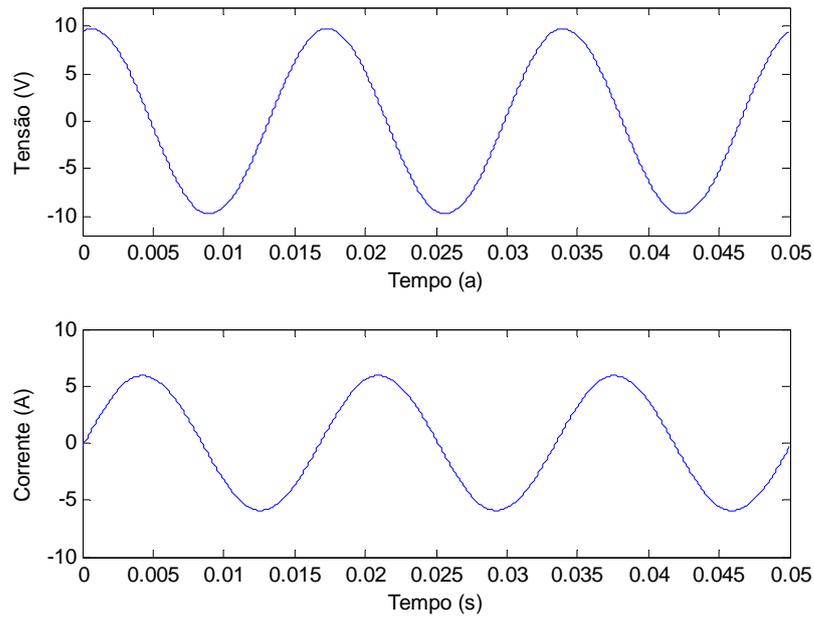


Figura 4.11 – Tensão e corrente para a situação linear.

Os valores eficazes obtidos a partir desses sinais são:

$$V_{EF} = 6,887 [V]$$

$$I_{EF} = 4,182 [A]$$

De acordo com o produto ponto a ponto entre tensão e corrente, obtém-se a potência instantânea, como mostrado na Figura 4.12.

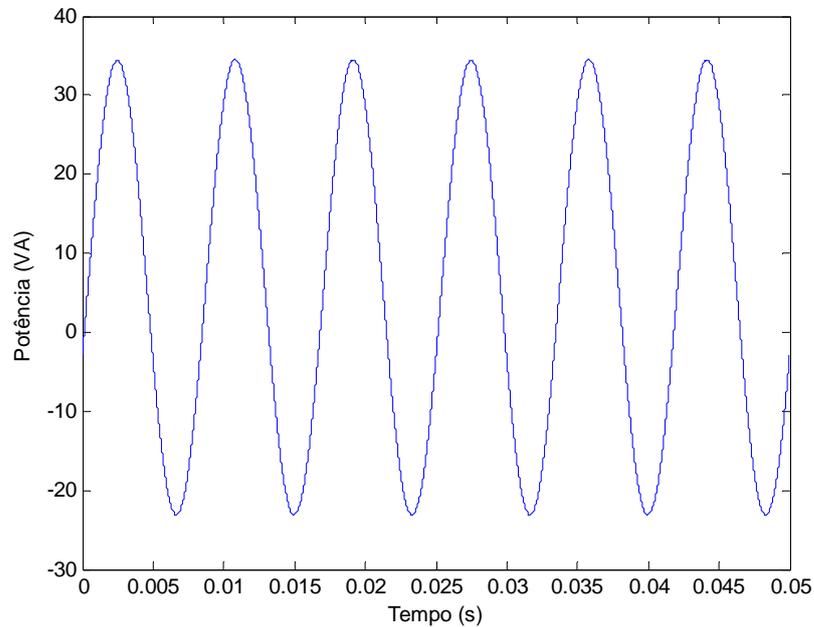


Figura 4.12 – Potência para a situação linear.

Por último, calcula-se a energia dissipada através do cálculo amostra a amostra e do cálculo baseado nas séries de Fourier, cujos comentários são realizados ao final desse item.

$$\mathcal{E}_{total} = 20,427 [kWh]$$

$$\mathcal{E}_{Fourier} = 20,315 [kWh]$$

Paralelamente, foi realizada a simulação para a situação de carregamento não linear, na qual a carga utilizada foi também o conversor de 6 pulsos alimentando um resistor. O sistema de simulação, tal como foi modelado, é mostrado na Figura 4.13.

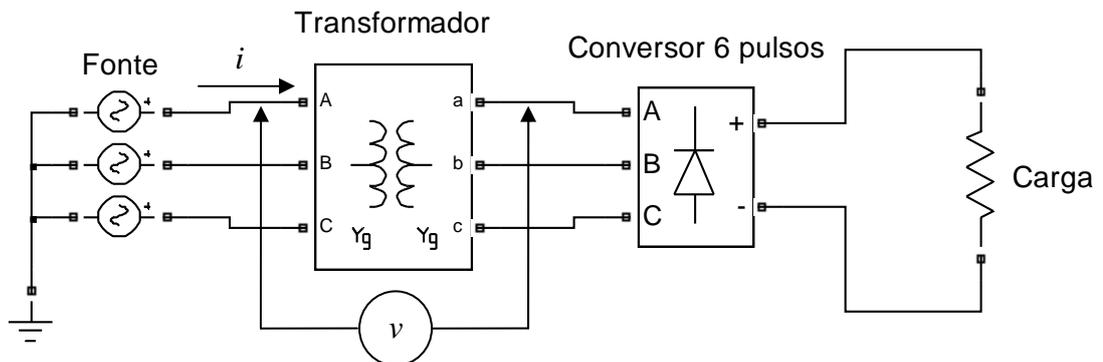


Figura 4.13 – Sistema de simulação 2 – carga não linear.

As formas de onda de tensão e corrente são mostradas na Figura 4.14. A seguir, são mostrados os resultados obtidos através do cálculo de valores eficazes para as formas de onda mostradas na Figura 4.14. Também, na Figura 4.15 é retratado o comportamento da potência instantânea.

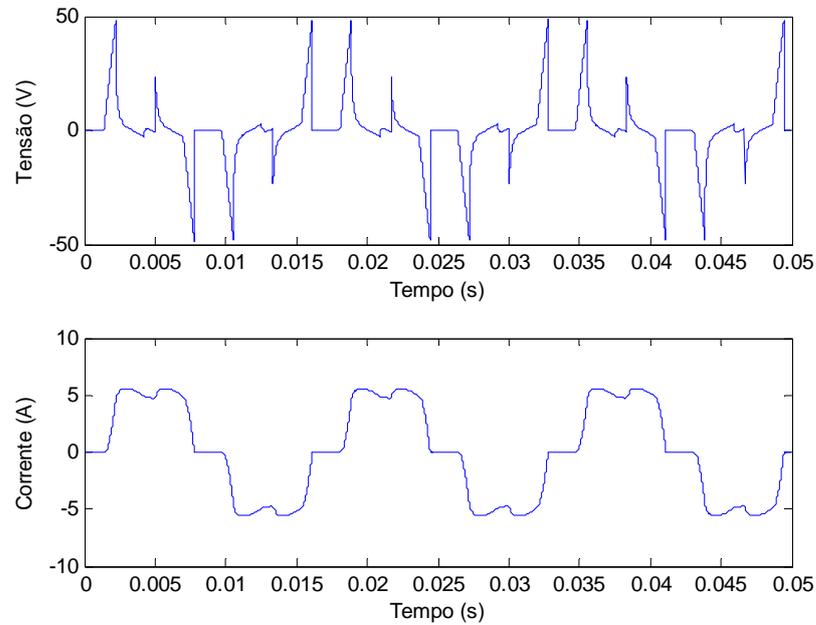


Figura 4.14 – Tensão e corrente para a situação não linear.

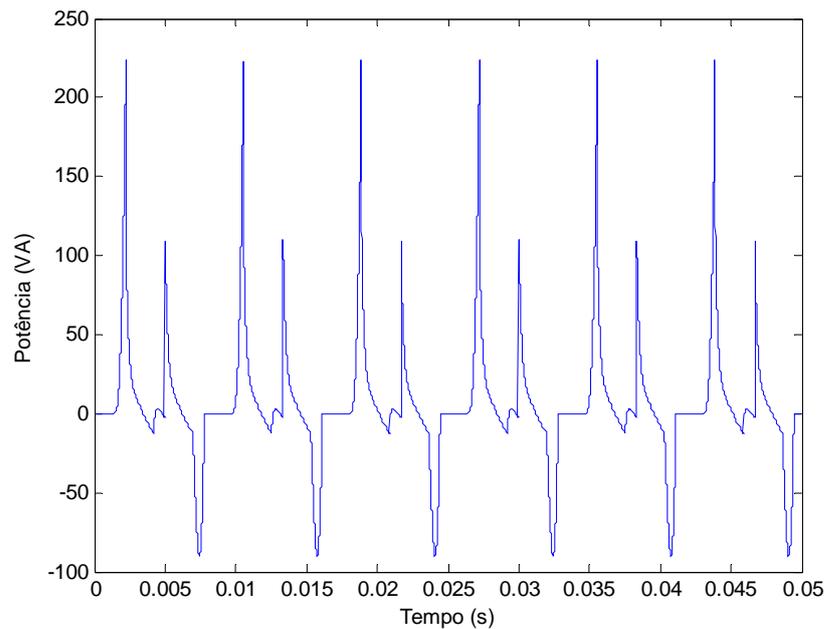


Figura 4.15 – Potência para a situação não linear.

$$V_{EF} = 13,160 [V]$$

$$I_{EF} = 4,182 [A]$$

Nota-se que a forma de onda da tensão é resultante direta da distorção de tensão provocada pela circulação da corrente que alimenta a carga não linear, ou seja, a queda de tensão no transformador é diretamente influenciada tanto pela distorção da corrente quanto pela impedância do mesmo. Fato este que faz com que o valor eficaz da queda de tensão seja expressivamente diferente entre as situações linear e não linear.

A partir da potência instantânea, que apresenta um aspecto semelhante ao da tensão, obtém-se a energia através do cálculo ponto a ponto e da utilização de séries de Fourier.

$$\mathcal{E}_{total} = 20,430 [kWh]$$

$$\mathcal{E}_{Fourier} = 20,314 [kWh]$$

Observa-se que as diferenças entre a energia dissipada para as duas situações de carregamento são mínimas, tais que a variação percentual pode ser obtida da seguinte maneira, para cada forma de cálculo:

$$\Delta\mathcal{E}_{total} = 0,003 kWh = 0,015 \%$$

$$\Delta\mathcal{E}_{Fourier} = 0,001 kWh = 0,005 \%$$

Primeiramente a pequena diferença reafirma as conclusões obtidas a partir dos resultados do item 4.3.1, ou seja, sem a influência do efeito pelicular, a variação da energia dissipada, entre as situações de carregamento linear e não linear, é irrisória, independentemente da maneira de cálculo. Tão irrisória quanto é a diferença entre as variações para cada forma de cálculo, fato que mostra que as duas maneiras de cálculo não devem resultar em diferentes resultados quando não se leva em conta o efeito pelicular.

4.4 Análise Comparativa

Primeiramente, observa-se que todas as simulações realizadas resultaram, comparativamente, em valores de condizentes com o esperado através da análise teórica.

Notou-se, quando da comparação entre as formas de cálculo para a obtenção da energia dissipada (amostra a amostra *versus* séries de Fourier), que independentemente da forma utilizada, o resultado para a energia dissipada foi praticamente o mesmo.

Paralelamente, para as situações com o resistor e com o transformador realizando o papel de elo no circuito, observou-se o mesmo comportamento. Em outras palavras, calculando a energia dissipada no equipamento elétrico ou pelas amostras ou pelas séries de Fourier, obtêm-se resultados praticamente idênticos.

Esses comportamentos evidenciam o fato de que, uma vez que as correntes eficazes são idênticas, o parâmetro que influencia na dissipação de energia, de tal maneira a diferenciá-las entre a situação de carregamento linear e não linear, é o efeito pelicular.

Fato é que o efeito pelicular influencia na dissipação de energia. Porém, com qual intensidade? É pertinente levar o mesmo em consideração? Influencia também no resultado obtido por cada maneira de cálculo? De que forma? Influencia da mesma forma para correntes transitórias do que para correntes de variadas frequências?

4.5 Considerações Finais

O objetivo das simulações computacionais, para este trabalho de doutorado, é, claramente, a obtenção de parâmetros de comparação, uma vez que os resultados obtidos são praticamente idênticos independentemente da não linearidade da carga.

Responsabilidade neste capítulo também foi o levantamento de algumas questões a serem respondidas através da análise dos resultados das medições laboratoriais.

Por fim, contribuição deste, foi, ainda, prover entendimento teórico necessário para a realização das medições laboratoriais, bem como, principalmente, para as respectivas análises.

Capítulo 5

Medições e Análise dos Resultados do Sistema 1

*“A sabedoria não nos é dada.
É preciso descobri-la por nós
mesmos, depois de uma viagem
que ninguém nos pode poupar
ou fazer por nós.”*

Marcel Proust

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados das medições obtidos, bem como as análises dos resultados realizadas, através de cada conjunto de testes ensaiado com o sistema de medição 1. Para tanto, como relata o item 5.2, inicialmente foram definidas as situações para as quais as medições foram realizadas.

5.2 Definição das Situações a Serem Medidas

De acordo com o levantamento teórico realizado no capítulo 2, e com as simulações computacionais, cujas análises estão apresentadas no capítulo 4, foram definidos três conjuntos de testes dos quais, os dois primeiros são realizados com o resistor de níquel-cromo, da mesma maneira descrita capítulo 3. Complementarmente, o terceiro conjunto de testes foi realizado através da substituição do resistor supracitado por um banco de resistores, haja vista a necessidade de se obter uma maior dissipação de energia.

Em seguida são detalhados os três conjuntos de testes.

5.2.1 Conjunto de Testes 1: Correntes Senoidais de Variadas Freqüências

Buscou-se, nesse conjunto de testes, obter a curva de aquecimento do resistor devido à aplicação de correntes senoidais de variadas freqüências, de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Situações de medição para o sistema 1.

Situação	Freqüência (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)
1	DC	1,0 – Ar 5,0 – Água	30	Até o equilíbrio
2	60			
3	300			
4	420			
5	660			
6	780			
7	1020			
8	1140			
9	2000			
10	3000			
11	4000			
12	5000			

A escolha dessas situações se justifica da seguinte maneira:

- Situação 1 – Medição com corrente contínua: objetiva a obtenção de uma situação de referência, para posterior comparação;
- Situações 2 a 8: Aquecimento provocado, individualmente, pelas mais significativas componentes harmônicas típicas da onda de corrente de um conversor de corrente alternada (ca) em corrente contínua (cc) de 6 pulsos;
- Situações 9 a 12: Aquecimento provocado por valores mais elevados de frequência, até a capacidade máxima da fonte.

As situações detalhadas na tabela 5.1 foram realizadas sob duas condições: uma tendo o ar como fluido em contato com o resistor e outra, substituindo tal fluido por água destilada³. Vale observar que as situações de 7 a 12 são realizadas apenas pela fonte Califórnia, devido à capacidade máxima de operação da fonte Omicron, que é de 1000 Hz. Assim sendo, admitiu-se para a situação 7, quando da alimentação em corrente constante, um sinal de frequência 1000 Hz.

Para as situações nas quais se pôde apenas utilizar a fonte Califórnia (tensão constante), definiu-se o valor da tensão necessária para se obter 1 Ampère de corrente. Dessa maneira, é necessária a alteração do valor eficaz da tensão conforme a alteração da frequência. Vale observar que, os valores de tensão ajustados para cada situação foram devidamente registrados, uma vez que estes podem trazer informações importantes acerca da influência do efeito pelicular no valor da resistência.

5.2.2 Conjunto de Testes 2: Onda Distorcida versus Somatório de Senóides

Esse conjunto de testes foi realizado com o objetivo de comparar as seguintes situações:

- aquecimento provocado por uma corrente distorcida, composta pelos principais harmônicos típicos existentes em uma corrente de um conversor de ca em cc de 6 pulsos;

³ Quando da realização das primeiras experiências laboratoriais notou-se um comportamento totalmente inverso ao esperado. Observou-se um comportamento inversamente proporcional entre o valor da resistência e o aumento da temperatura. Depois de uma criteriosa análise dos resultados, concluiu-se que esse comportamento era devido à baixa resistividade da água de torneira (aproximadamente 200 $\Omega.m$). Portanto, para a eliminação deste problema utilizou-se água destilada (resistividade aproximada de 10.000 $\Omega.m$). Os testes posteriores, com a utilização de água destilada, resultaram em um comportamento qualitativamente condizente com o esperado.

- composição do aquecimento provocado individualmente por cada componente harmônico de corrente mais significativo da mesma onda distorcida de corrente.

A Tabela 5.2 descreve essas situações e, a Figura 5.1 ilustra a forma de onda em questão.

Tabela 5.2 – Segundo conjunto de testes para o sistema 1.

Situação	Corrente Eficaz (A)	Fluido	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)
Distorcida	5,171	Água destilada	30	Após 20 minutos de aquecimento
1° harmônico 60 Hz	5,000			
5° harmônico 300 Hz	0,953			
7° harmônico 420 Hz	0,731			
11° harmônico 660 Hz	0,389			
13° harmônico 780 Hz	0,413			

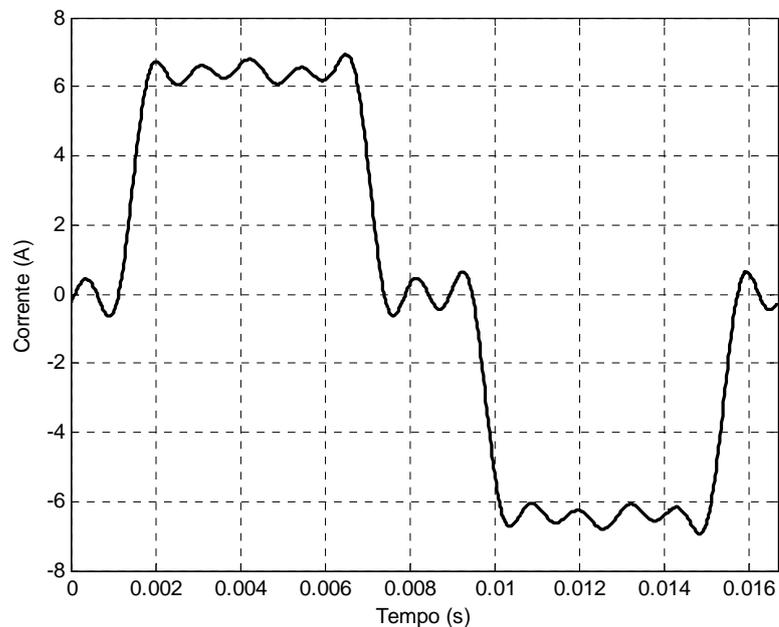


Figura 5.1 – Forma de onda da corrente distorcida composta pela fonte.

Vale observar que o conteúdo harmônico foi limitado pela frequência máxima que a fonte Omicron que é de 1 kHz.

5.2.3 Conjunto de Testes 3: Ensaios com o Banco de Resistores

Para esse conjunto de testes foi realizada a substituição do resistor de Ni-Cr constituinte do sistema 1 por um banco de resistores (vide Figura 5.2), que tem por função é dissipar uma potência maior do que o primeiro.

O objetivo desse ensaio é analisar o acréscimo das perdas elétricas em resistores submetidos a condições não ideais de operação, ou seja, condições diferentes da normalidade de circulação de correntes senoidais de 60 Hz.

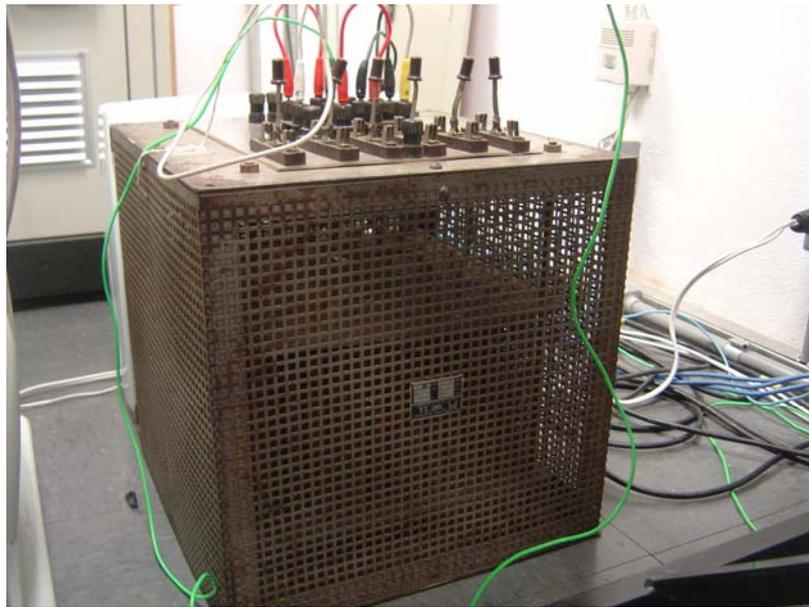


Figura 5.2 – Banco de resistores.

Feita a substituição, foram realizados três ensaios diferentes, cujas descrições estão apresentadas a seguir:

- Correntes de Diferentes Frequências – Mesmos Valores Eficazes: Esse primeiro ensaio tem por meta obter o valor do acréscimo de perdas no banco de resistores quando submetido à circulação de uma corrente senoidal de frequência 780 Hz (frequência do maior harmônico a ser utilizado nos outros ensaios) em comparação com a corrente senoidal de 60 Hz de mesmo valor eficaz;
- Corrente Senoidal versus Corrente Distorcida – Mesmos Valores Eficazes: O segundo conjunto de testes também tem por objetivo avaliar o acréscimo de perdas elétricas no resistor, porém, diferentemente, quando da substituição da corrente senoidal de 60 Hz por outra distorcida de mesmo valor eficaz;

- *Componente Fundamental versus Corrente Distorcida – Valores Eficazes Diferentes*: o terceiro conjunto de testes visa a obtenção do acréscimo das perdas quando o mesmo for submetido à corrente distorcida, cuja decomposição é dada pela Tabela 5.3, em comparação com as perdas provocadas pela circulação de uma corrente senoidal de 60 Hz de magnitude idêntica à da sua própria componente fundamental.

5.3 Resultados das Medições e Análises

Conforme descrito na Tabela 5.1, foram ensaiadas todas as situações previstas, algumas inclusive repetidas diversas vezes, cada vez mais atentando para a manutenção constante dos fatores de influência, de tal maneira a maximizar a confiabilidade dos resultados.

Os itens subseqüentes exploram os resultados obtidos a partir das situações ensaiadas.

5.3.1 Resultados das Medições do Conjunto de Testes 1

5.3.1.1 Situações 1 a 7 Ensiadas com o Fluido Ar

Inicialmente, como já dito, foi utilizada como fonte de corrente constante a Caixa Omicron. Desta maneira, de acordo com a Tabela 5.1, foram ensaiadas as situações de 1 até 7⁴. Também inicialmente, foi utilizado o próprio ar, interno à caixa de isopor, como fluido em contato com o resistor.

Como primeiro resultado, obteve-se as curvas de aquecimento para as situações 1 a 7, no entanto, com o objetivo de obter-se uma visualização mais clara optou-se por mostrar apenas as situações 1, 2 e 7, ou seja, as situações de aquecimentos provocados por correntes senoidais de frequências 0, 60 e 1000 Hz. A Figura 5.3 ilustra essas três curvas de aquecimento.

Primeiramente pode-se notar, qualitativamente, que o sistema de medição da maneira como foi desenvolvido atende às expectativas. Em outras palavras, devido ao fato de que quanto maior a frequência, maiores a taxa de aquecimento e valor final de temperatura, o que conseqüentemente contribui para a validade do sistema de medição.

⁴ Vale lembrar que para a situação 7 foi configurada a frequência de 1000 Hz, e não de 1020 Hz, devido à capacidade máxima da fonte Omicron.

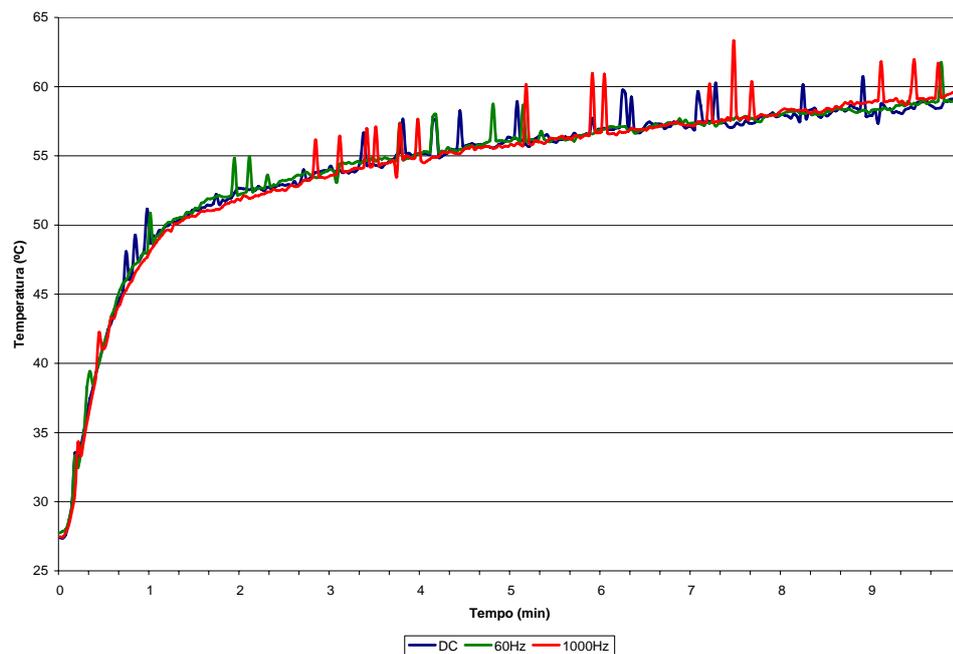


Figura 5.3 – Aquecimento registrado para as situações 1, 2 e 7.

Observa-se a existência de alguns picos transitórios no valor da temperatura. Estes são devidos ao tempo de resposta do transmissor de temperatura, ou seja, dependendo do instante de registro, o transmissor não indica a temperatura com exatidão. Os valores registrados quando desses picos de temperatura foram desconsiderados.

Nota-se, pelo aspecto exponencial da curva de aquecimento, que o sistema tende a entrar em equilíbrio térmico, fato que indica que o sistema não é adiabático. Este comportamento se deve apenas ao fato da isolamento térmica ser insuficiente para o tipo de fluido utilizado, ou seja, a troca de calor é favorecida devido ao ar ser um fluido muito volátil e pouco viscoso. Este comportamento será mais explorado quando da análise das medições tendo como fluido a água.

Optou-se então, desde que a exigência de temperatura ambiente constante seja atendida, por utilizar a temperatura de equilíbrio como um fator de comparação entre o aquecimento provocado pela corrente ajustada a cada frequência.

Pode-se notar, ainda na Figura 5.3, que foi considerado, a priori, um tempo suficiente para o processo de aquecimento de aproximadamente 10 minutos. No entanto, após uma análise do comportamento das curvas de aquecimento obtidas, observa-se que a taxa de variação da temperatura em função do tempo, ainda é considerável ao final da medição.

Decidiu-se então ampliar o tempo de aquecimento para 30 minutos, a fim de obter um retrato mais amplo do processo de aquecimento. A Figura 5.4 mostra as curvas de aquecimento obtidas durante tal intervalo de tempo.

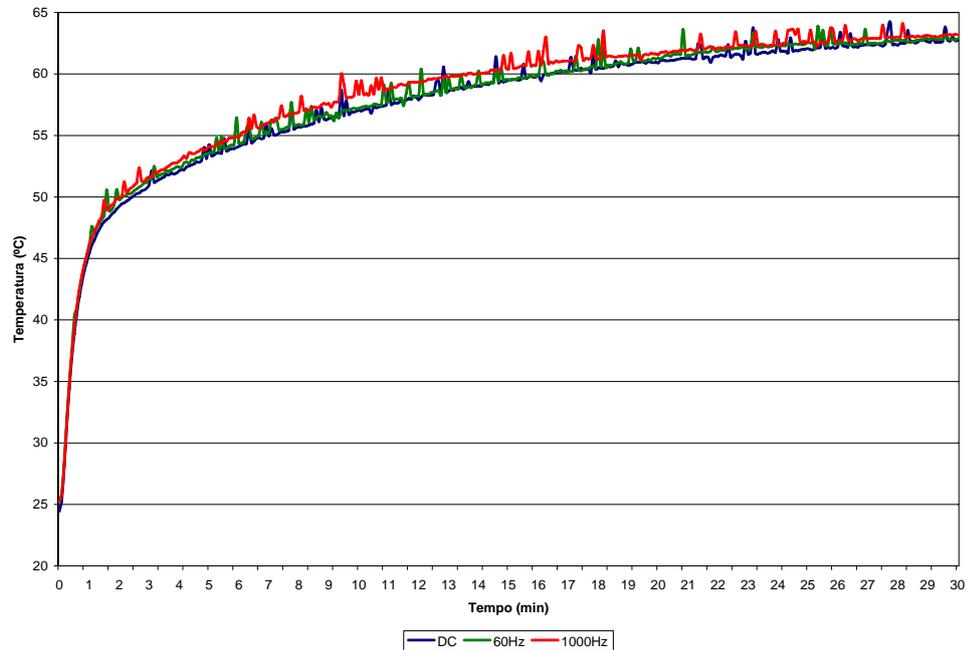


Figura 5.4 – Curvas de aquecimento durante 30 minutos.

Comparativamente, nota-se que a taxa de variação da temperatura diminui bastante nas proximidades do instante 30 minutos em relação ao instante 10 minutos. Para efeito de praticidade, concluiu-se que a partir de 20 minutos de aquecimento pode-se registrar a temperatura como sendo a final. É sabido que o aquecimento continua acontecendo após este intervalo de tempo, no entanto, uma vez que as análises das situações são comparativas entre si, desde que se registre o valor da temperatura no mesmo instante de tempo para ambas as situações, pode-se admitir esses registros como sendo as temperaturas de equilíbrio de cada situação.

Além da ampliação do tempo de aquecimento, também se obtiveram valores mais constantes para a corrente fornecida pela fonte e para a temperatura ambiente inicial e durante o processo de aquecimento.

Ainda assim, observa-se que, dependendo do instante de tempo escolhido, as temperaturas para as três situações assumem valores relativamente diferentes, como pode ser visualizado pela Figura 5.5, que traz uma vista em *zoom* do intervalo entre 20 e 30 minutos.

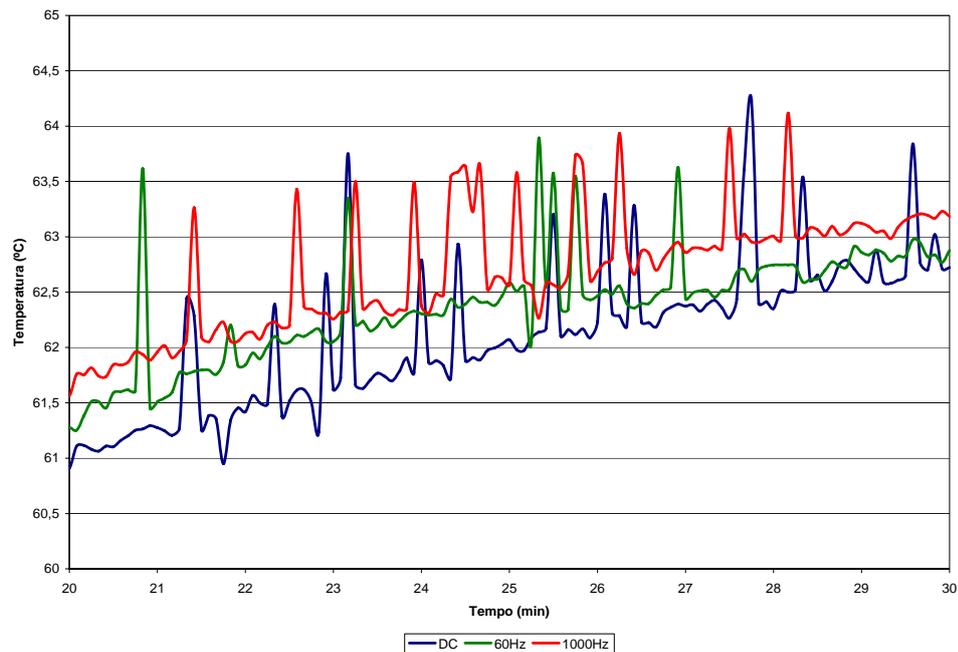


Figura 5.5 – Vista em *zoom* das curvas de aquecimento mostradas na Figura 5.4.

Para solucionar esse problema optou-se por realizar uma regressão e encontrar uma expressão logarítmica para cada curva de aquecimento. As expressões obtidas através desse procedimento de regressão são mostradas na equação (5.1).

$$\begin{aligned} T_{DC} &= 5,920 \cdot \ln(12t) + 28,678 \\ T_{60} &= 5,800 \cdot \ln(12t) + 29,542 \\ T_{1000} &= 5,893 \cdot \ln(12t) + 29,648 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Onde t é o tempo em minutos.

Dessa maneira é possível traçar o comportamento do aquecimento (Figura 5.6), bem como avaliar as expressões para quaisquer instantes de tempo, por exemplo, se essas expressões forem avaliadas no instante 30 minutos, obter-se-iam os seguintes resultados para as temperaturas:

$$\begin{aligned} T_{DC} &= 63,52 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ T_{60} &= 63,69 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ T_{1000} &= 64,33 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

Observa-se que são obtidos, como já era de se esperar, valores crescentes para a temperatura em função da frequência do sinal de corrente injetado. Isso comprova que a energia dissipada no resistor é tanto maior quanto a frequência da corrente elétrica que flui pelo mesmo. No entanto, devido às dimensões e ao tipo de material do resistor, essa variação se manifesta de maneira extremamente sutil. Outro fator complicador é a

manutenção da temperatura ambiente constante, uma vez que qualquer alteração da mesma pode acarretar em mudanças significativas nos resultados.

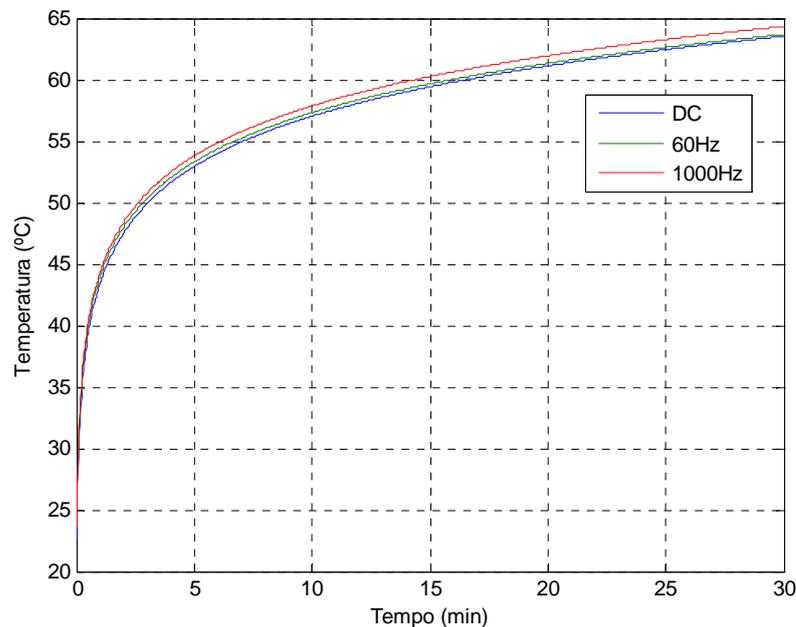


Figura 5.6 – Comportamento do aquecimento.

Assim sendo, para se ter uma visão mais ampla da variação da dissipação de energia em função da frequência da corrente, optou-se por utilizar a fonte Pacific, devido ao fato da mesma ser capaz de gerar sinais até 5000 Hz.

5.3.1.2 Situações 1 e 12 Ensaçadas com o Fluido Ar

Através da utilização da fonte Pacific, pôde-se ensaiar as situações de 1 a 12. No entanto, nunca é demais recordar que esta fonte gera sinais de tensão constante.

Como a gama de resultados é muito extensa, optou-se por avaliar somente as situações de maior interesse e, certamente, uma análise pertinente é a comparação entre extremos, ou seja, a comparação entre as situações de 60 Hz e de 5000 Hz.

A medição com a fonte Pacific foi realizada de tal maneira a ser viável o ajuste da tensão para se manter a corrente o mais constante possível durante o processo de aquecimento. Utilizando a situação 60 Hz conhecida no item 5.3.1.1, obteve-se, a partir da medição, a expressão (5.2) para a obtenção da temperatura quando do aquecimento à 5000 Hz.

$$T_{5000} = 6,03 \cdot \ln(12t) + 29,612 \quad (5.2)$$

Em conformidade com a análise das expressões (5.1), a temperatura obtida através da avaliação da expressão (5.2) no instante 30 minutos é $T_{5000} = 65,11 [^{\circ}\text{C}]$. Para se obter uma visão mais ampla, a Figura 5.7 mostra uma comparação entre as curvas de aquecimento, traçadas a partir das expressões (5.1) e (5.2), para as situações de 60 e 5000 Hz.

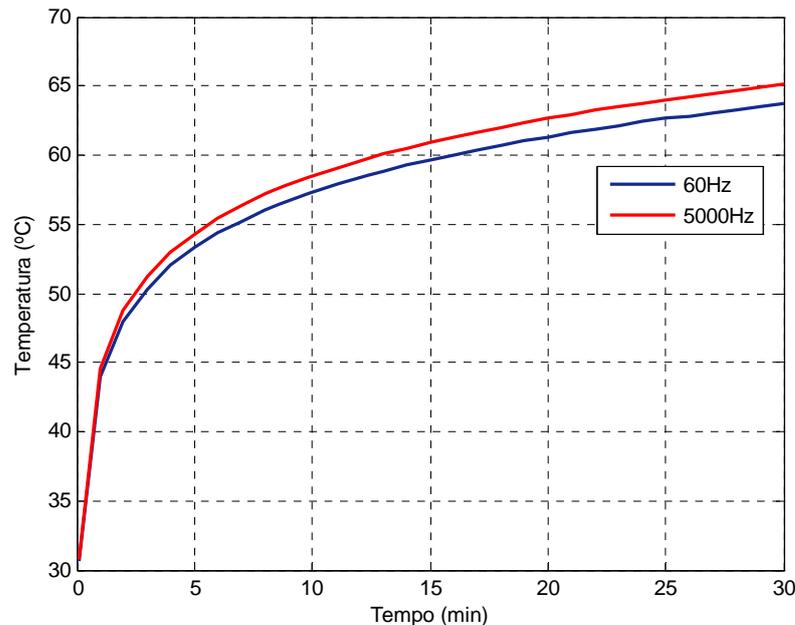


Figura 5.7 – Aquecimento para 60 e 5000 Hz.

É fato, empiricamente comprovado, que a temperatura, avaliada em um mesmo instante de tempo, é maior quanto maior for a frequência da corrente que circula pelo resistor. Esse comportamento pode ser notado tanto na Figura 5.6 quanto na Figura 5.7, nas quais a curva de aquecimento é tão mais acentuada quanto maior a frequência do sinal.

Sabendo-se desse fato, analisar-se-á no item 5.3.2 a influência dessa diferença de temperatura no acréscimo das perdas elétricas no resistor de níquel-cromo.

5.3.1.3 Situações 1 e 12 Ensaçadas com o Fluido Água

Analogamente ao item 5.3.1.2 foram ensaiadas todas as situações descritas na Tabela 5.1, no entanto, a título de comparação, mostram-se aqui, na Figura 5.8, as curvas de aquecimento obtidas quando da aplicação de sinais corrente às frequências de 0, 60 e 1000 Hz.

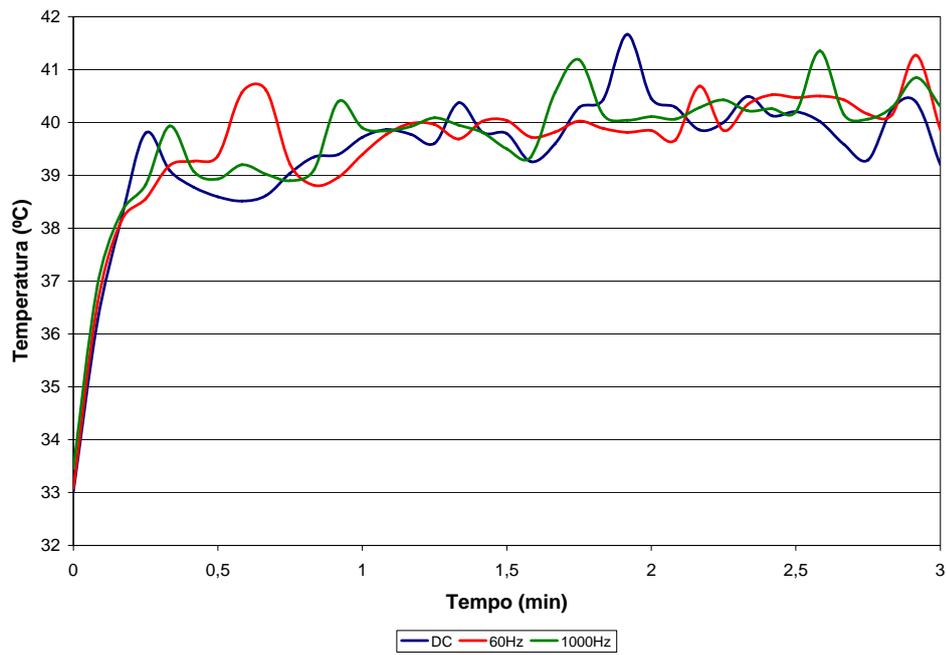


Figura 5.8 – Curvas de aquecimento com a água como fluido.

Da mesma maneira, como foi realizada anteriormente, a Figura 5.9 apresenta as curvas de aquecimento obtidas através do procedimento de regressão logarítmica, através das quais se podem estender os períodos de visualização. Por exemplo, de acordo com a Figura 5.7, utilizou-se um período de 30 minutos.

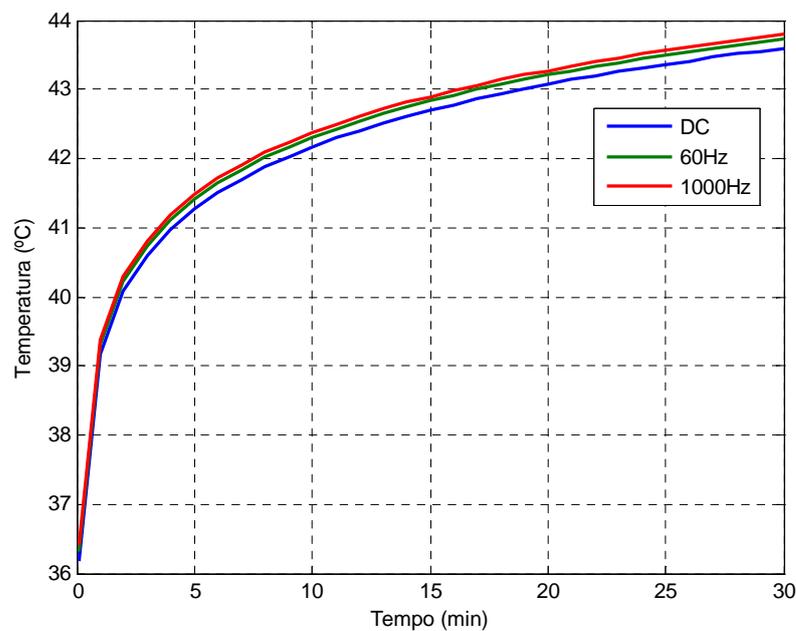


Figura 5.9 – Regressão logarítmica.

Observa-se que, diferentemente do comportamento mostrado na Figura 5.6, além da temperatura no instante final ser menor⁵, o aquecimento a 60 Hz se aproximou mais do aquecimento a 1000 Hz, ao invés de se assemelhar com o aquecimento à corrente contínua. Este fato reitera a dificuldade na manutenção das variáveis de influência constantes.

De acordo com a pequena área de secção transversal do resistor, era de se esperar um comportamento mais próximo ao da Figura 5.9, uma vez que, à corrente contínua, a corrente elétrica circula por toda a área do resistor.

Desta maneira, as análises complementares realizadas nos itens subseqüentes são baseadas principalmente nos resultados extraídos das medições tendo como fluido a água destilada. Obviamente, fazendo-se necessário, como é o caso do item 5.3.2.2, são mostrados resultados obtidos através de medições com o ar, uma vez que todas as situações foram ensaiadas para os dois fluidos.

5.3.2 Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 1

5.3.2.1 Acréscimo das Perdas (A_p)

Partindo-se do princípio de que a transferência de calor é idêntica para todas as situações medidas, pode-se fazer uma análise comparativa entre as mesmas. Em outras palavras, de posse do comportamento da temperatura em função do tempo para cada frequência do sinal de corrente e admitindo-se a temperatura ambiente constante e idêntica durante todos os ensaios, podem-se estimar as perdas, para cada frequência, da seguinte maneira:

$$P_h = R_h i_h^2 = mc \frac{dT}{dt} \quad (5.3)$$

Onde h denota a frequência em questão, m a massa do resistor, c o calor específico do mesmo, T a temperatura e t o tempo. Para o resistor de níquel-cromo, tem-se:

$$m = 4 \text{ [g]}$$

$$c = 0,11 \left[\frac{\text{Cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

⁵ Apesar da corrente aplicada ser 5 vezes maior do que a aplicada quando da utilização do ar como fluido em contato com o resistor, a capacidade térmica da água também é maior, uma vez que a massa de água (4 kg) e o calor específico da mesma são maiores do que os do ar. Esses fatores contribuem significativamente para a dificuldade de aquecimento da água ou, em outras palavras, utilizando água ao invés de ar, a capacidade do sistema em resfriar o resistor é aumentada substancialmente.

Assim sendo tem-se, para cada frequência, a seguinte relação entre perdas e aquecimento:

$$P_h = 0,44 \frac{dT}{dt}$$

No entanto, não faz sentido uma avaliação isolada do quadro obtido com a aplicação de cada frequência, faz sentido sim a avaliação comparativa entre duas ou mais frequências. Tal avaliação, objetivando a obtenção do acréscimo de perdas (A_p), pode ser feita da seguinte maneira:

$$A_p = \frac{P_{h1}}{P_{h2}} = \frac{\frac{dT_1}{dt}}{\frac{dT_2}{dt}} \quad (5.4)$$

Por exemplo, a comparação das perdas causadas por uma corrente de 1000 Hz em relação a uma corrente de 60 Hz é realizada da seguinte forma:

$$A_{p-1000/60} = \frac{P_{1000}}{P_{60}} = \frac{\frac{d(5,8927 \cdot \ln(12t) + 29,648)}{dt}}{\frac{d(5,80 \cdot \ln(12t) + 29,542)}{dt}} = \frac{2,5928}{2,552} = 1,016$$

De acordo com esse resultado obteve-se, através da medição do aquecimento, que as perdas elétricas para uma corrente de 1000 Hz são 1,6% maiores do que as perdas causadas por uma corrente de mesmo valor eficaz, porém de frequência 60 Hz.

Fazendo-se a mesma análise para o aquecimento à frequência de 5000 Hz tem-se que o acréscimo de perdas é de 3,97%, ou seja:

$$A_{p-5000/60} = \frac{P_{5000}}{P_{60}} = \frac{2,6532}{2,552} = 1,0397$$

Analogamente, é possível obter o comportamento descrito no item 5.3.2.2.

5.3.2.2 Comportamento da Resistência em função da Frequência com o Ensaio Realizado com o Fluido Ar

Sabendo-se que as perdas elétricas são proporcionais à resistência e ao quadrado da corrente e, admitindo-se que valor eficaz seja idêntico para as correntes de cada frequência pode-se estimar que a variação da resistência em função da frequência é idêntica à variação das perdas. Em outras palavras, por exemplo, a resistência obtida para o níquel-cromo quando da aplicação de uma corrente de frequência 5000 Hz é 3,97% maior do que a obtida à mesma corrente eficaz, para a frequência de 60 Hz.

Paralelamente à medição da temperatura, foram registrados os valores da corrente e da tensão entre os terminais do resistor. Dessa forma, a partir dos resultados das 12 situações medidas, pode-se traçar o comportamento da relação tensão por corrente em função da frequência, em outras palavras, trabalhando-se com um circuito puramente resistivo, pode-se obter o comportamento da resistência em função da frequência, obviamente à temperatura constante. A Figura 5.10 mostra tal comportamento.

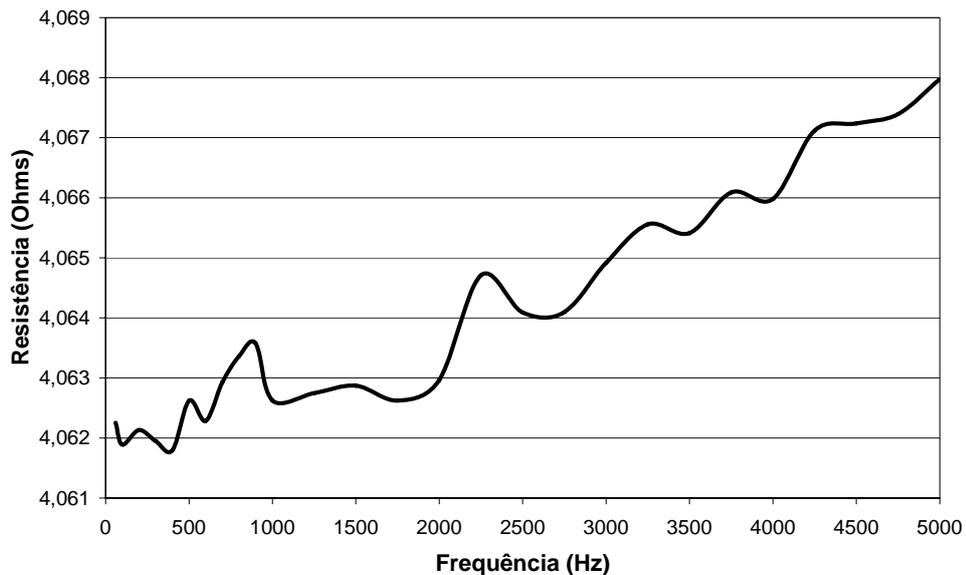


Figura 5.10 – Resistência versus frequência.

Nota-se que, medindo-se tensão e corrente, o acréscimo da resistência à frequência de 5000 Hz em relação a 60 Hz foi de 0,14%, valor este bem diferente do obtido através da medição de temperatura, que é de 3,97%. Essa diferença pode ser justificada pelos seguintes fatos:

- Dificuldade de manutenção da temperatura ambiente constante: a transferência de calor dificilmente será idêntica para todas as situações ensaiadas;
- Dificuldade de manutenção da corrente eficaz constante: a própria fonte de corrente possui uma limitação quanto à estabilidade do valor exato de corrente;
- Dificuldade na estabilização do valor de temperatura: a saída do transmissor de temperatura apresenta uma alta instabilidade;
- Precisão do sensor de temperatura.

Dessa maneira, de acordo com a dificuldade de se superar essas barreiras optou-se, a priori para o sistema 1, pela utilização da relação tensão/corrente para a obtenção do comportamento da resistência em função da temperatura. Por outro lado, as medições com o sistema 2 terão como principal grandeza de análise a temperatura.

Ainda assim, utilizando a relação tensão/corrente, é possível notar na Figura 5.10 um comportamento ligeiramente instável, devido a aproximações e faixas de exatidão dos equipamentos. Assim sendo, desejando-se obter um comportamento aproximado para a variação da resistência, é possível obter uma curva de tendência baseada nos resultados medidos através, por exemplo, de uma regressão polinomial, como mostra a Figura 5.11.

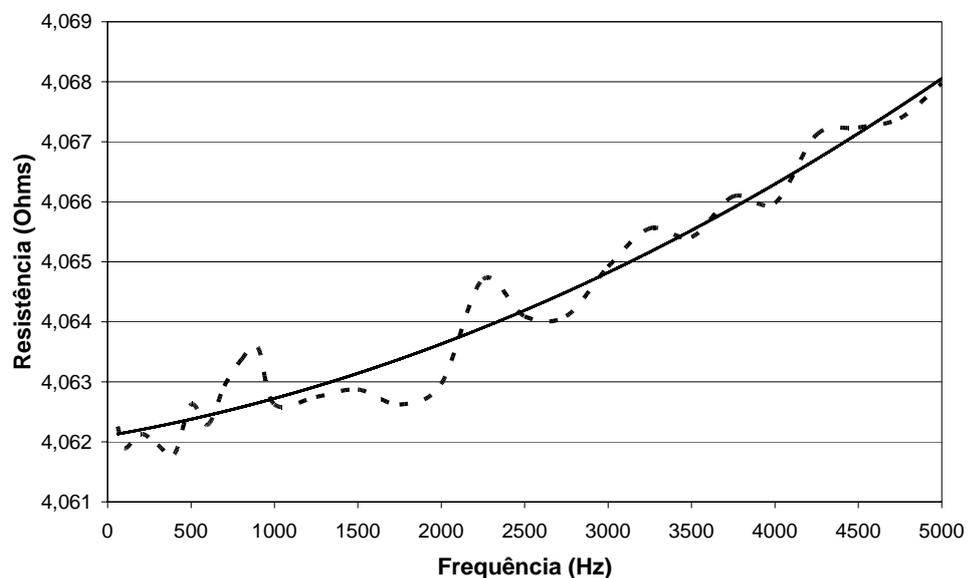


Figura 5.11 – Curva de tendência.

É ainda possível obter, através do procedimento de regressão, a equação polinomial relacionando a resistência com a frequência, como mostrado na expressão (5.5).

$$R = (3 \cdot 10^{-14}) f^3 - (8 \cdot 10^{-11}) f^2 + (8 \cdot 10^{-7}) f + 4,0619 \quad (5.5)$$

Onde o último termo é a resistência à corrente contínua e, os outros três definem, empiricamente, a variação da resistência com a frequência. Dessa maneira a equação (5.5) pode ser reescrita de acordo com a equação (5.6).

$$R = c_1 f^3 - c_2 f^2 + c_3 f + R_{DC} \quad (5.6)$$

Onde c_1 , c_2 e c_3 são coeficientes que dependem das dimensões do resistor e das propriedades elétricas e magnéticas (condutividade e permeabilidade) do material utilizado para confeccionar o mesmo. Assim sendo, as medições proveram dados suficientes para a

determinação desses três coeficientes (expressões (5.7), (5.8) e (5.9)) para um resistor de níquel-cromo de raio igual a 1 mm, comprimento 1,5 m e massa igual a 4 g.

$$c_1 = 3 \cdot 10^{-14} \quad (5.7)$$

$$c_2 = 8 \cdot 10^{-11} \quad (5.8)$$

$$c_3 = 8 \cdot 10^{-7} \quad (5.9)$$

É importante enfatizar que para qualquer alteração na área da secção transversal do resistor, ou mesmo no tipo de material utilizado, esses três coeficientes devem ser alterados. Por exemplo, a título de curiosidade, a mesma metodologia foi aplicada a um cabo de cobre de secção transversal e comprimento consideravelmente maiores que o resistor de níquel-cromo e, como resultado foi obtido o comportamento do quociente tensão/corrente mostrado na Figura 5.12.

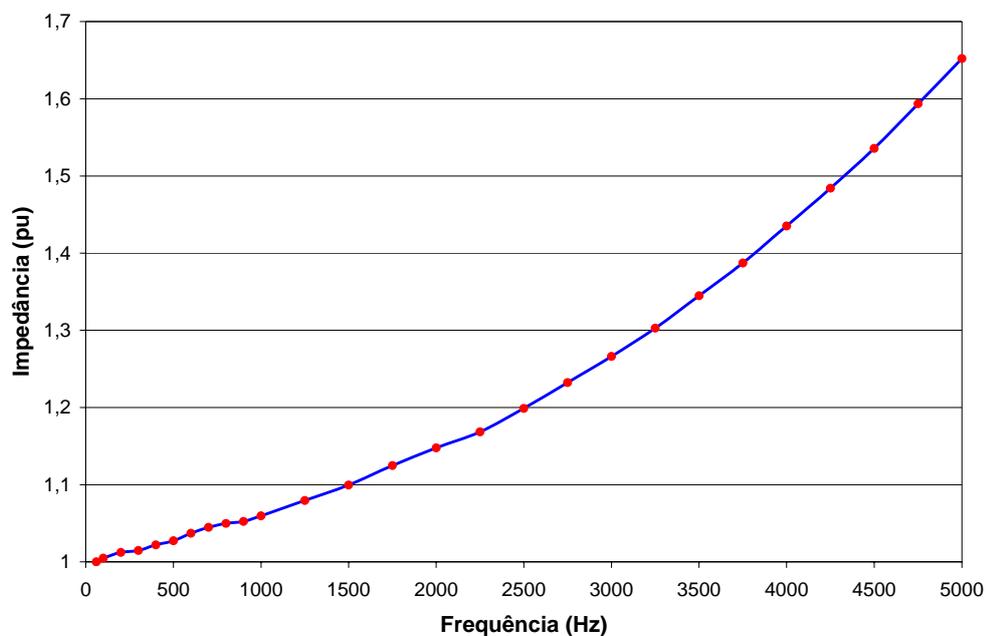


Figura 5.12 – Impedância do cabo de cobre versus frequência.

Observa-se que a variação foi extremamente mais brusca do que a obtida para o resistor de níquel-cromo. Este fato se deve principalmente ao acréscimo da reatância do cabo devido ao aumento da frequência. Esta questão será mais bem explorada no item subsequente, quando das análises das medições tendo a água como fluido em contato com o resistor.

5.3.2.3 Comportamento da Resistência em função da Frequência com o Ensaio Realizado com o Fluido Água

A título de confirmação do resultado, as mesmas situações foram ensaiadas após a substituição do ar pela água como fluido em contato com o resistor. A Figura 5.13 traz o comportamento obtido para a relação tensão/corrente e a Figura 5.14 mostra o resultado do procedimento de regressão polinomial.

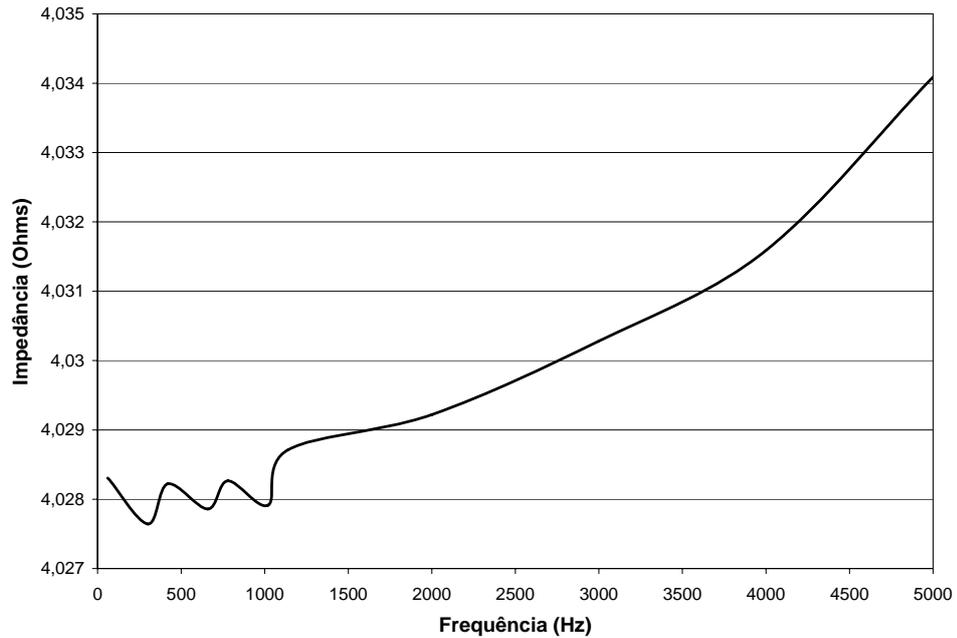


Figura 5.13 – Comportamento da impedância em função da frequência.

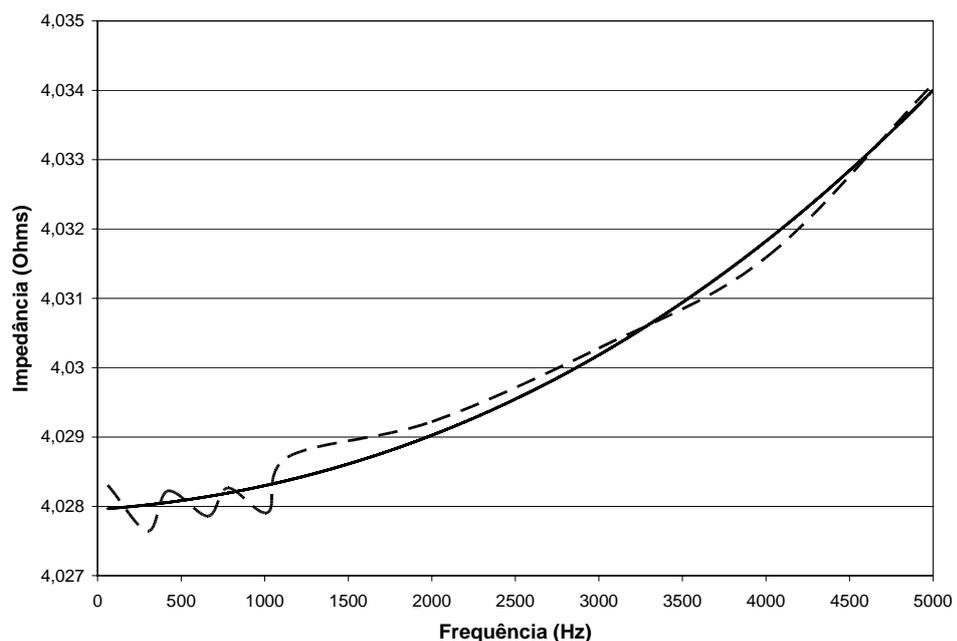


Figura 5.14 – Regressão polinomial.

Observa-se, inicialmente, uma diminuição dos valores da resistência em relação aos obtidos com o fluido ar, mostrados na Figura 5.10. Essa diminuição se deve a mudança do ponto de medição, uma vez que foi eliminado um cabo de cobre entre o voltímetro e o resistor de níquel-cromo, na tentativa de aumentar a confiabilidade do resultado, de tal maneira que a tensão lida pelo voltímetro passou a ser ligeiramente menor. No entanto, a variação percentual entre a resistência a 5000 Hz e a 60 Hz foi praticamente idêntica. Numericamente subiu de 0,14% para 0,15%.

Comparativamente também, a equação (5.10) mostra a expressão obtida através da regressão logarítmica.

$$Z = (8 \cdot 10^{-15}) f^3 + (2 \cdot 10^{-10}) f^2 + (2 \cdot 10^{-7}) f + 4,028 \quad (5.10)$$

Nota-se que, em comparação à equação (5.5), os coeficientes desta são ligeiramente menores porém, em contrapartida, todos os termos acrescem o valor da resistência, ao passo que anteriormente tinha-se o termo de f^2 subtraindo o valor da mesma.

Adicionalmente foi medida a relação tensão/corrente em outro ponto do circuito, situado entre os terminais da conexão série de um cabo de cobre (destinado à conexão da fonte Pacific ao resistor de níquel-cromo) e o próprio resistor de níquel cromo, de tal maneira que a impedância resultante seja acrescida, como monitorado através do aumento da queda de tensão. Uma mostra do comportamento da impedância em relação à frequência pode ser visualizada na Figura 5.15, bem como na equação (5.11).

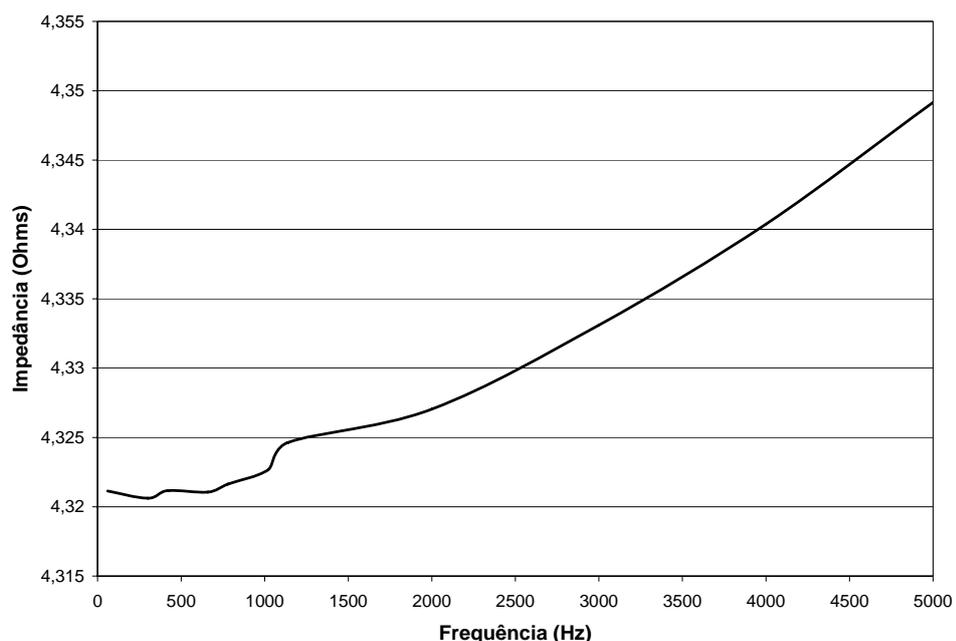


Figura 5.15 – Impedância do conjunto cabo de cobre + resistor de níquel cromo.

$$R_l = -(4 \cdot 10^{-14})f^3 + (1 \cdot 10^{-9})f^2 + (1 \cdot 10^{-6})f + 4,3205 \quad (5.11)$$

Pode-se notar que a variação percentual entre a resistência a 5000 Hz e a 60 Hz foi mais acentuada, passando de 0,15% para 0,7%. Esse fato se deve principalmente ao acréscimo da reatância indutiva do cabo, uma vez que o fator de potência unitário a 60 Hz passou a ser de 0,995 para 5000 Hz.

Conseqüentemente pode-se obter o comportamento apenas da impedância do cabo de cobre, através da queda de tensão no mesmo, como mostram a Figura 5.16 e a equação (5.12).

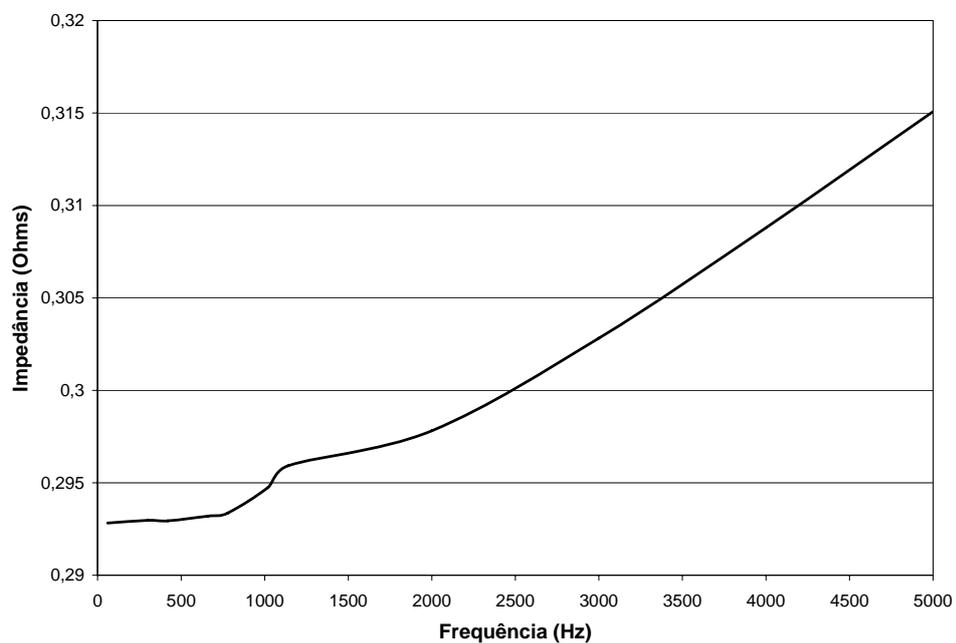


Figura 5.16 – Impedância do cabo de cobre.

$$R_{Cu} = -(5 \cdot 10^{-14})f^3 + (9 \cdot 10^{-10})f^2 + (1 \cdot 10^{-6})f + 0,2925 \quad (5.12)$$

Pode-se notar que a variação percentual entre a resistência a 5000 Hz e a 60 Hz foi bem mais acentuada, passando de 0,15% no níquel-cromo para 7,5% no cobre. Esse fato se deve sim à mudança do material, mas principalmente, como dito anteriormente, se deve ao acréscimo da reatância indutiva do cabo.

Comentários adicionais sobre os resultados obtidos pelas medições com sistema 1, mostrados neste item, são feitos no item 5.4.

5.3.3 Resultados das Medições do Conjunto de Testes 2

Neste item são mostrados os resultados obtidos a partir dos ensaios descritos na Tabela 5.2, através dos quais se objetivou comparar o aquecimento provocado por uma corrente de forma de onda distorcida com o somatório dos aquecimentos provocados por cada uma das componentes harmônicas constituintes da mesma corrente distorcida separadamente.

As curvas de aquecimento obtidas através do ensaio de todas essas situações são mostradas na Figura 5.17.

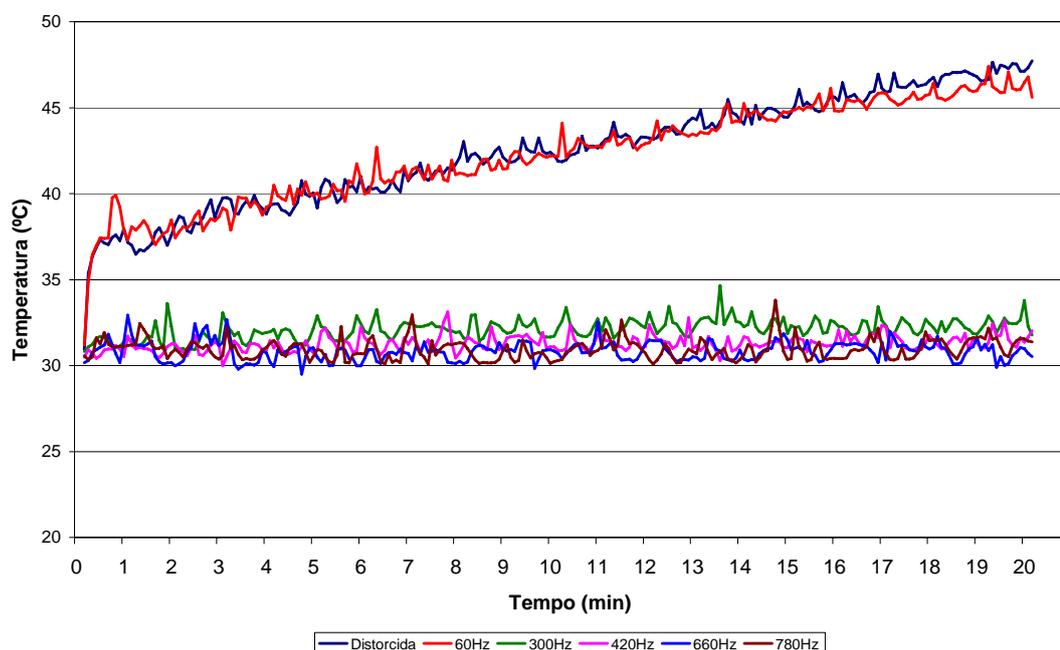


Figura 5.17 – Curvas de aquecimento das situações ensaiadas.

Vale observar que a duração do ensaio foi de 20 minutos ao invés de 30, tempo suficiente para a obtenção do comportamento da curva de aquecimento para cada situação.

A título de se obter uma melhor visualização, a Figura 5.18 mostra as curvas de aquecimentos provocados pela corrente distorcida e pela corrente de 60 Hz, já a Figura 5.19 o faz para as situações restantes.

Nota-se um comportamento da curva de aquecimento ligeiramente mais acentuado quando provocado pela corrente distorcida em comparação com a corrente de 60 Hz. Dessa maneira, a questão é a seguinte: os aquecimentos provocados pelas componentes harmônicas mostradas na Figura 5.19 suprem a diferença entre o aquecimento provocado pela corrente distorcida em comparação com a de 60 Hz? Em outras palavras, o

aquecimento provocado pelos harmônicos mostrados na Figura 5.19 é igual à diferença dos aquecimentos provocados pela corrente distorcida e a de 60 Hz?

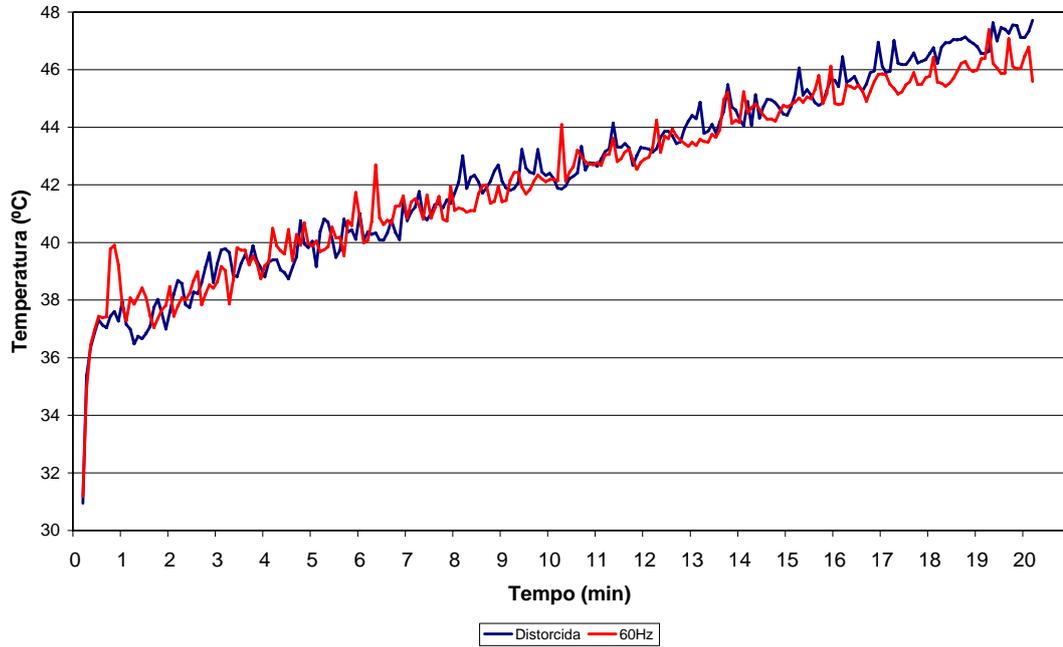


Figura 5.18 – Curvas de aquecimento provocadas pelas correntes distorcida e senoidal de 60 Hz.

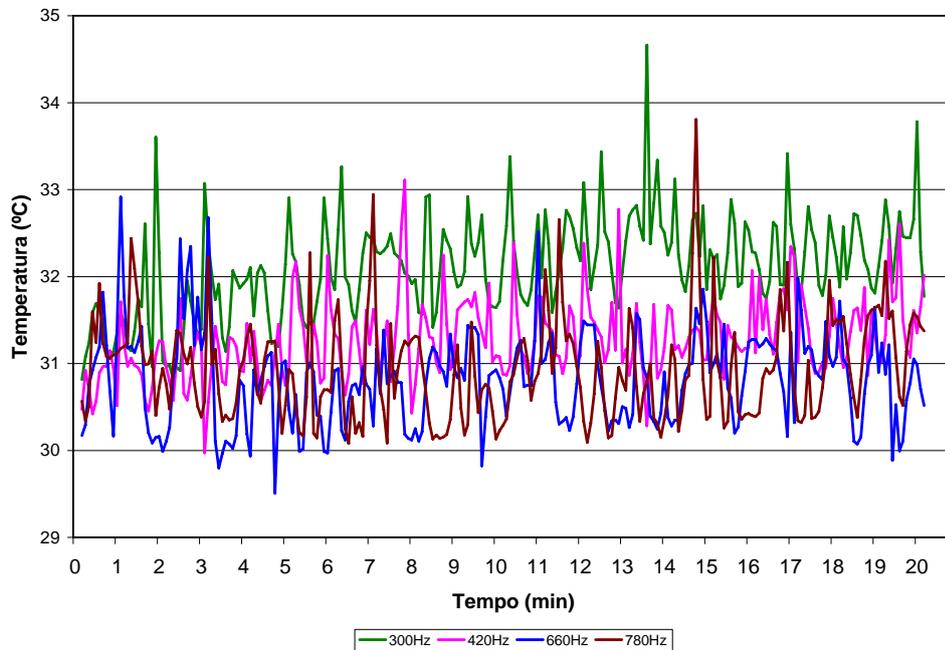


Figura 5.19 – Curvas de aquecimento provocadas pelas correntes senoidais de 300, 420, 660 e 780 Hz.

Inicialmente, para responder essa pergunta, procede-se a utilização da mesma técnica de tratamento de sinais – a regressão linear. As equações (5.13) trazem as expressões

obtidas para cada curva de aquecimento medida, já a Figura 5.20 e a Figura 5.21 mostram as curvas traçadas a partir das regressões lineares.

$$\begin{aligned}
 T_{dist} &= 0,5364 \cdot t + 36,944 \\
 T_{60} &= 0,4752 \cdot t + 37,398 \\
 T_{300} &= 0,048 \cdot t + 31,612 \\
 T_{420} &= 0,0276 \cdot t + 30,98 \\
 T_{660} &= 0,0036 \cdot t + 30,788 \\
 T_{780} &= 0,0072 \cdot t + 30,863
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

Onde t é o tempo em minutos.

Observa-se que a curva de aquecimento da componente de 780 Hz (13º harmônico) se apresenta mais acentuada do que a da componente de 660 Hz (11º harmônico). Este comportamento se deve ao fato de que, além da frequência ser maior, o valor eficaz da primeira também é maior do que o da segunda.

De posse das curvas de aquecimento e das expressões obtidas através das regressões, é possível realizar a análise comparativa detalhada no item 5.3.4.

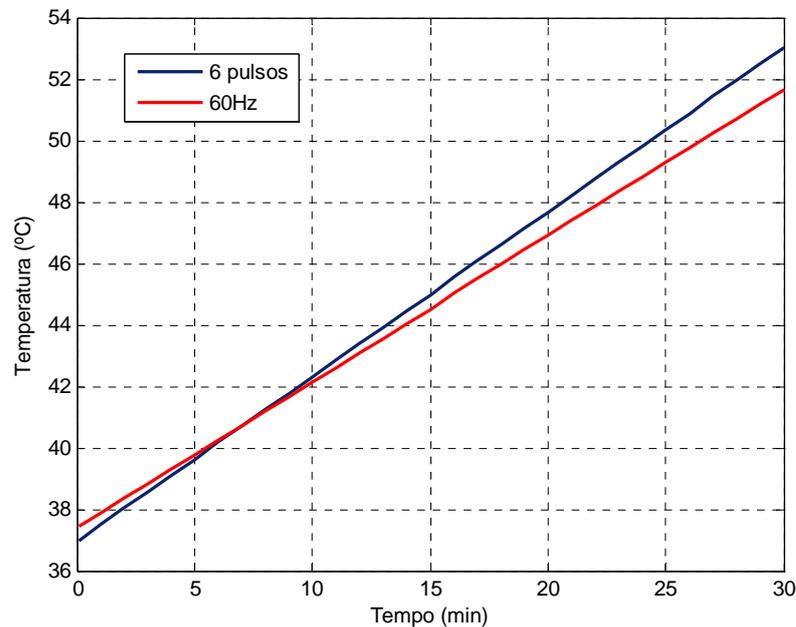


Figura 5.20 – Regressão linear – Distorcida e 60 Hz.

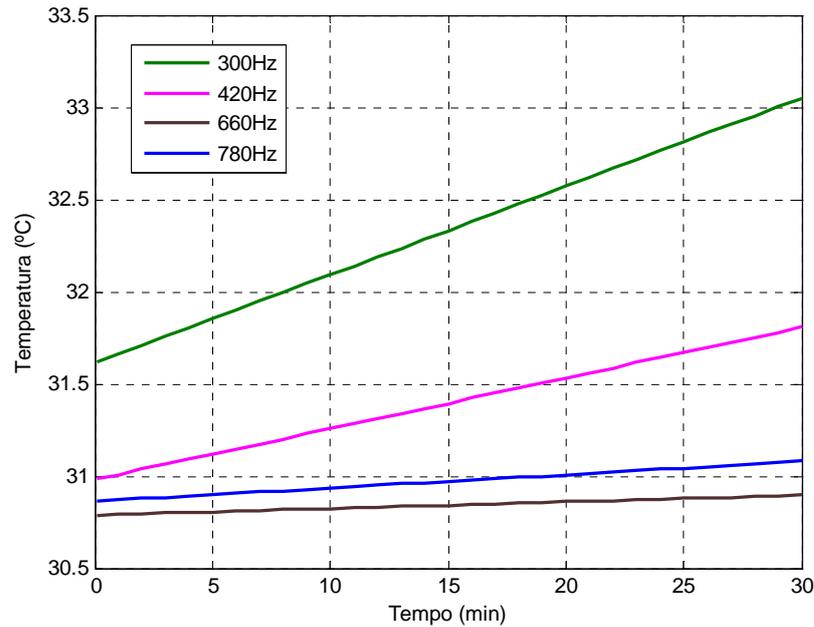


Figura 5.21 – Regressão linear – 300, 420, 660 e 780 Hz.

5.3.4 Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 2

Uma vez que se tem o comportamento do aquecimento provocado por cada corrente em função do tempo, pode-se comparar o aquecimento provocado pela corrente distorcida com o provocado pela combinação de suas harmônicas mais significativas. Este comparativo será realizado tendo como parâmetro base a energia dissipada no resistor, ou seja, a base comparativa é a seguinte:

$$\varepsilon_{dist} = \sum \varepsilon_h \tag{5.14}$$

Onde h denota a ordem harmônica que compõe a onda distorcida, ou seja, para a análise desse conjunto de medições h assume os valores 1, 5, 7, 11, e 13, correspondentes às frequências de 60, 300, 420, 660 e 780 Hz.

Dessa maneira, calcula-se a energia dissipada devido à circulação de cada corrente da seguinte maneira:

$$\varepsilon_h = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \tag{5.15}$$

Como a massa e o calor específico são admitidos constantes para todas as experiências, tem-se:

$$\varepsilon_h = k \cdot \frac{dT}{dt} \tag{5.16}$$

Assim sendo, em conformidade com a equação (5.13), obtém-se os seguintes valores para as energias:

$$\varepsilon_{dist} = k \cdot 0,5364$$

$$\varepsilon_1 = k \cdot 0,4752$$

$$\varepsilon_5 = k \cdot 0,048$$

$$\varepsilon_7 = k \cdot 0,0276$$

$$\varepsilon_{11} = k \cdot 0,0036$$

$$\varepsilon_{13} = k \cdot 0,0072$$

Para possibilitar a comparação, o somatório das energias dissipadas individualmente por cada componente harmônica é:

$$\sum \varepsilon_h = \varepsilon_1 + \varepsilon_5 + \varepsilon_7 + \varepsilon_{11} + \varepsilon_{13} = k \cdot 0,5616$$

Dessa maneira, nota-se que a energia dissipada pela composição das harmônicas é maior do que a dissipada pela corrente distorcida. Numericamente pode-se quantificar da seguinte maneira:

$$\frac{\sum \varepsilon_h - \varepsilon_{dist}}{\varepsilon_{dist}} = \frac{0,5616 - 0,5364}{0,5364} = 4,7\%$$

Em outras palavras, de acordo com a medição realizada, a energia dissipada pela corrente distorcida foi menor do que a dissipada pela combinação de suas harmônicas. Observa-se que, esse comportamento pode ter sido afetado pela dificuldade em se manter constante a temperatura ambiente, bem como a corrente fornecida pela fonte. Para aumentar a confiabilidade, as experiências foram repetidas e os resultados, apesar de diferentes, mantiveram sempre a mesma tendência. Comentários adicionais serão realizados no item 5.4.

5.3.5 Resultados das Medições do Conjunto de Testes 3

Como visto anteriormente, foram realizados três conjuntos de testes com o banco de resistores, cujos resultados são mostrados nos subitens abaixo:

- Correntes de Diferentes Frequências – Mesmos Valores Eficazes

Para a realização desse ensaio, o banco de resistores foi submetido à circulação das duas correntes, 60 e 780 Hz, uma por vez. As curvas de aquecimento registradas durante as duas medições são mostradas na Figura 5.22.

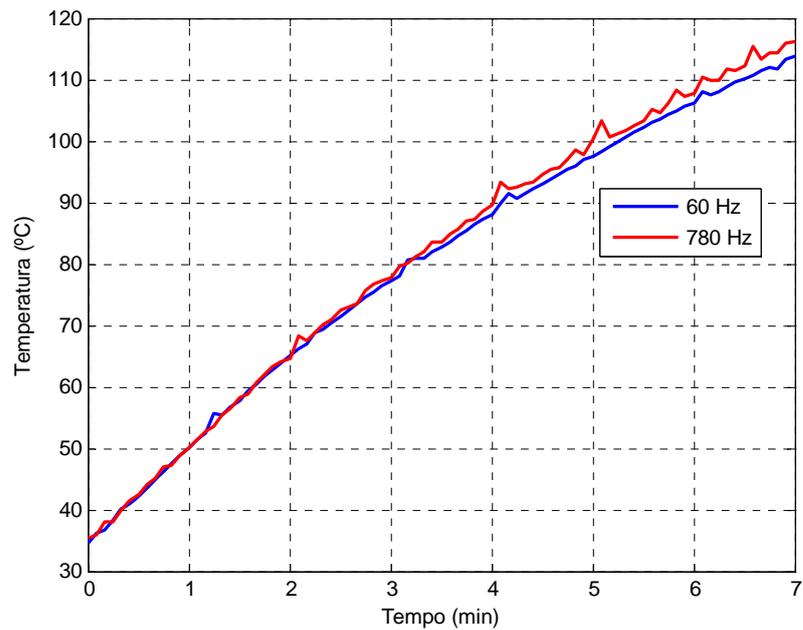


Figura 5.22 – Curvas de aquecimento do banco resistivo para 60 Hz e 780 Hz.

- Corrente Senoidal versus Corrente Distorcida – Mesmos Valores Eficazes

A composição harmônica da corrente distorcida é dada pela Tabela 5.3, com base nos principais componentes existentes em uma ponte retificadora de 6 pulsos. O aquecimento provocado por tal corrente é comparado com o provocado por uma corrente senoidal de 60 Hz de mesmo valor eficaz. Analogamente, a Figura 5.23 apresenta as respectivas curvas de aquecimento registradas.

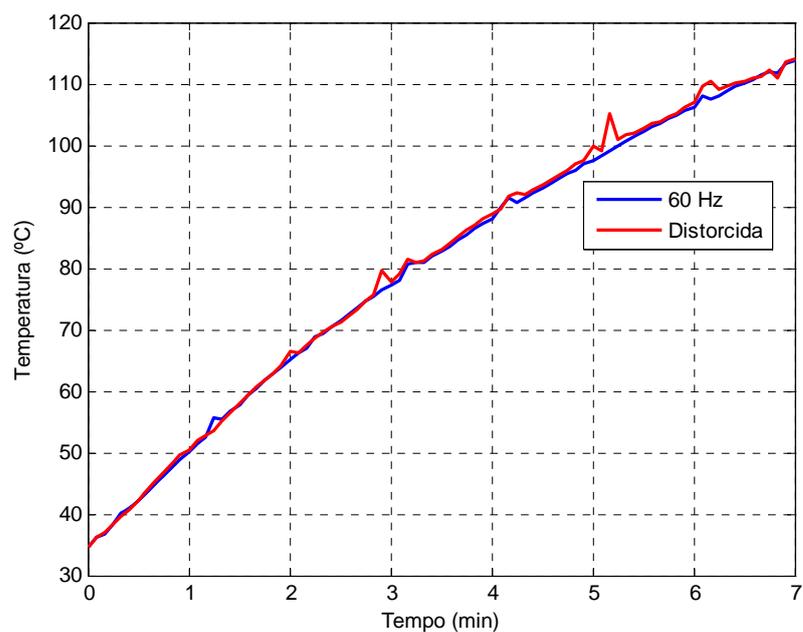


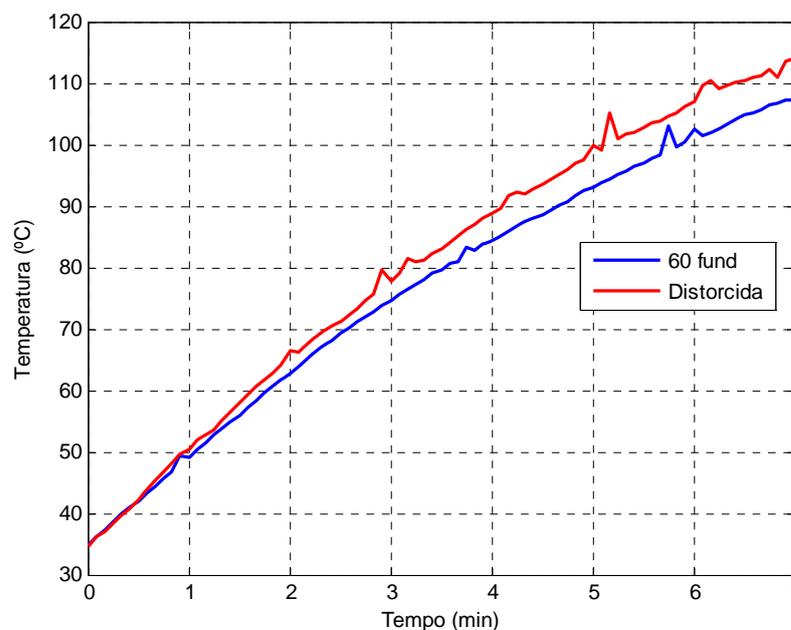
Figura 5.23 – Curvas de aquecimento para correntes senoidal e distorcida ambas de mesmo valor eficaz.

Tabela 5.3 – Composição harmônica do sinal distorcido.

Componente harmônica	1	5	7	11	13
Magnitude (% da fundamental)	100	20	15	7,8	8,3
Ângulo (°)	0	167,3	168	-22,8	-25,8

- Componente Fundamental versus Corrente Distorcida – Valores Eficazes Diferentes

Como visto, o objetivo nesse ensaio é registrar o aquecimento provocado pela corrente distorcida (Tabela 5.3) em comparação com o provocado por uma corrente senoidal de 60 Hz de magnitude idêntica à componente fundamental da própria corrente distorcida. Devido à diferença de magnitudes entre as correntes, como pode ser observado na Figura 5.24, as curvas de aquecimento apresentam uma maior divergência entre si.

**Figura 5.24 – Curvas de aquecimento para fundamental e distorcida de valores eficazes diferentes.**

As análises comparativas correspondentes a esses três conjuntos de medições com o banco de resistores são realizadas no item 5.3.6.

5.3.6 Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 3

Com respeito às tradicionais maneiras de se calcular o acréscimo de perdas em questão, a análise apresentada é realizada com o intuito de se diferenciar um acréscimo de perdas devido a um aumento do valor eficaz, de outro acréscimo devido puramente à distorção da forma de onda da corrente.

Uma vez que se têm os comportamentos de temperatura em função do tempo para cada situação ensaiada, é possível partir para a análise do comportamento das perdas elétricas sob as condições não ideais de operação supracitadas.

A priori, como pode ser notado nas figuras apresentadas no item 5.2.3, existe a dificuldade, devido à instabilidade do transmissor de temperatura, de se trabalhar com os valores adquiridos durante o ensaio, portanto lança-se mão de técnicas de regressão. Observando a tendência da curva de aquecimento, optou-se, prezando a praticidade, por se trabalhar com regressões lineares. Dessa forma, em (5.17) tem-se as expressões obtidas para cada curva de aquecimento medida.

$$\begin{aligned} T_{60} &= 0,9323t + 39,837 \\ T_{780} &= 0,9661t + 39,536 \\ T_{dist} &= 0,9435t + 39,857 \\ T_{fund} &= 0,8628t + 39,660 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Onde t é o tempo em minutos.

De posse do comportamento da temperatura em função do tempo para cada uma das situações ensaiadas e, admitindo-se a temperatura ambiente constante e idêntica durante os ensaios, podem-se estimar as perdas, para cada situação, da seguinte maneira:

$$P_n = R_n i_n^2 = mc \frac{dT_1}{dt} \quad (5.18)$$

Onde n denota a situação em questão, m a massa do resistor, c o calor específico do mesmo, T_1 a temperatura e t o tempo. Admite-se para as duas situações que:

$$m_1 c_1 = m_2 c_2 = k$$

Assim sendo, tem-se, para cada situação, a seguinte relação entre perdas e aquecimento:

$$P_n = k \frac{dT}{dt} \quad (5.19)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio das outras análises, pode-se obter o acréscimo de perdas através da avaliação relativa entre duas situações: a de interesse e a senoidal.

$$A_p = \frac{P_m}{P_n} = \frac{\frac{dT_m}{dt}}{\frac{dT_n}{dt}} \quad (5.20)$$

Substituindo m e n pelas situações de interesse apresentadas nos três subitens do item V, pode-se realizar a comparação das respectivas perdas.

$$A_{p-780/60} = \frac{P_{780}}{P_{60}} = \frac{\frac{d(0,9661t + 39,536)}{dt}}{\frac{d(0,9323t + 39,837)}{dt}} = \frac{0,9661}{0,9323} = 1,036$$

$$A_{p-dist/60} = \frac{P_{dist}}{P_{60}} = \frac{\frac{d(0,9435t + 39,857)}{dt}}{\frac{d(0,9323t + 39,837)}{dt}} = \frac{0,9435}{0,9323} = 1,012$$

$$A_{p-dist/fund} = \frac{P_{dist}}{P_{fund}} = \frac{\frac{d(0,9435t + 39,857)}{dt}}{\frac{d(0,8628t + 39,660)}{dt}} = \frac{0,9435}{0,8628} = 1,094$$

A partir dos desenvolvimentos acima, pode-se enfatizar os resultados para as três situações ensaiadas:

- Uma corrente senoidal de 780 Hz dissipa 3,6 % a mais de potência no banco de resistores em comparação a uma corrente senoidal de 60 Hz;
- A corrente distorcida utilizada neste trabalho aumenta as perdas no banco de resistores em 1,2 % quando em comparação com uma corrente senoidal de 60 Hz e mesmo valor eficaz;
- A mesma corrente distorcida aumenta as perdas no banco de resistores em 9,4 % quando em comparação com uma corrente senoidal de 60 Hz de magnitude igual à sua própria componente fundamental.

De acordo com esses resultados pode-se fazer uma análise da divisão de “responsabilidades” do acréscimo das perdas elétricas sob condições não ideais em duas partes: a parte oriunda do aumento do valor eficaz da corrente e a parte inerente à distorção da forma de onda da mesma. Em outras palavras, o acréscimo das perdas se deve parte ao maior consumo de energia (ativa ou não ativa) devido à maior necessidade da carga e, parte se deve ao agravamento do efeito pelicular provocado pela distorção da forma de onda da corrente que circula pelo resistor.

Assim sendo e, com base nas comparações de perdas realizadas, pode-se quantificar tal divisão de “responsabilidades” da maneira ilustrada na Figura 5.25.

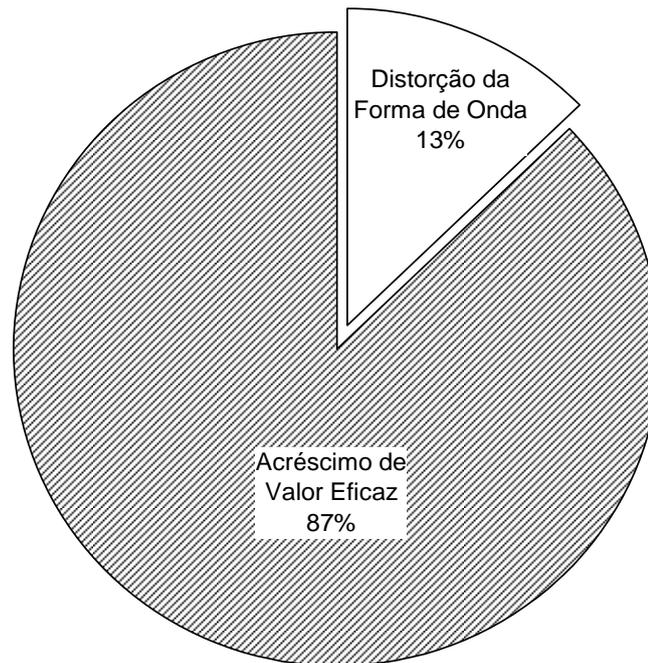


Figura 5.25 – Divisão das perdas entre distorção da forma de onda e acréscimo de valor eficaz.

As avaliações de acréscimo das perdas foram realizadas tanto em ambiente de simulação computacional quanto em ambiente de medição laboratorial. Para esta última foi desenvolvido um sistema de medição capaz de registrar valores de temperatura, a partir dos quais combinados com a metodologia de análise descrita torna-se possível determinar o acréscimo das perdas em equipamentos elétricos.

Com relação aos resultados obtidos a partir das simulações (Capítulo 4) observa-se que o valor das perdas no resistor se mantém praticamente constante quando se compara o impacto tanto de correntes senoidais de diferentes frequências quanto o impacto de correntes distorcidas em relação a correntes senoidais. Este fato evidencia que, utilizando uma resistência invariante com relação à frequência, não existe diferença, às vistas da energia dissipada no resistor, entre a circulação de uma corrente senoidal e uma distorcida.

Por outro lado, quando da realização do terceiro conjunto de simulações observou-se um acréscimo das perdas de 7,87 % devido à aplicação do sinal distorcido em comparação à aplicação de uma corrente senoidal de 60 Hz de magnitude idêntica à da componente fundamental da própria corrente distorcida. Obviamente este acréscimo se deve completamente ao aumento do valor eficaz da corrente que circula no resistor.

Conseqüentemente, comparando estes últimos com os resultados obtidos pelas medições observa-se que o primeiro conjunto de ensaios revelou que na prática as perdas aumentam 3,6 %, fato que se deve à maior influência do efeito pelicular.

No segundo conjunto de ensaios observou-se que as perdas aumentaram em 1,2 %, fato que também se conclui ser de responsabilidade da maior influência do efeito pelicular, uma vez que os valores eficazes utilizados para as ondas distorcida e senoidal foram os mesmos.

Com base no terceiro conjunto de ensaios registrou-se um acréscimo de perdas de 9,35 %, que devido ao fato de que a comparação é realizada entre duas situações de diferentes formas de onda e valores eficazes, pode-se obter uma relação entre a magnitude do efeito de cada um desses fatos. Como observado na Figura 5.25, a divisão foi calculada de tal maneira que os 9,35 % totais foram divididos em 8,15 % devido ao aumento do valor eficaz e 1,2 % devido à maior influência do efeito pelicular provocada pela distorção da forma de onda da corrente.

Observa-se que, os 8,15 % de acréscimo de perdas devido ao aumento do valor eficaz obtido através das medições se aproximam bastante dos 7,96 % obtidos através das simulações. Porém, na prática ainda existem mais 1,2 % de perdas a serem acrescentadas devido à influência do efeito pelicular que, como visto, não foi considerado durante a realização das simulações.

Por fim, conclui-se que, de acordo com as medições realizadas, as perdas devido à mudança do aspecto da forma de onda de senoidal para distorcida representam apenas 13 % do total das perdas, ao passo que o restante se deve ao aumento do valor eficaz da corrente. Esse fato indica que, para essa situação específica, a preocupação com o aumento das perdas deve-se voltar mais para o aumento do valor eficaz do que para a distorção da forma de onda. Vale enfatizar que se o resistor fosse diferente os resultados obtidos certamente seriam também diferentes, uma vez que a influência do efeito pelicular no mesmo também o seria.

5.4 Comentários Adicionais sobre as Medições com o Sistema 1

Inicialmente foram traçados alguns objetivos, para serem alcançados através das medições com o sistema 1. A maioria deles foi satisfatoriamente alcançada, já para outros, devido às dificuldades não previstas a priori, não foi possível obter resultados conclusivos. No entanto, como o principal objetivo desse sistema é, devido à sua simplicidade, a compreensão prática de fenômenos relacionados à variação da frequência em equipamentos elétricos, conclui-se que as medições, bem como suas respectivas análises foram realizadas com sucesso, uma vez que possibilitam uma melhor análise do sistema 2.

Dito isto, fazem-se pertinentes alguns comentários adicionais e conclusivos a respeito dos resultados obtidos através das medições com o sistema 1.

- 1º. Imprescindível é ressaltar a grande quantidade de dificuldades encontradas durante a realização das medições. Ainda que tenha sido feito um planejamento cauteloso para a execução das medições, durante a realização de cada uma das mesmas observou-se o surgimento de fatores que influenciam o resultado, até então desconsiderados ou mesmo desconhecidos. Dentre todas essas dificuldades, foram citadas nos itens anteriores, quando se fazia pertinente, as mais relevantes, que foram responsáveis pelas maiores preocupações;
- 2º. A mudança do fluido em contato com o resistor não alterou significativamente os resultados após devidamente analisados. Obviamente que a capacidade de refrigeração da água em relação à do ar é maior, no entanto, como todas as análises realizadas são comparativas, as principais diferenças devido às propriedades dos fluidos se mantêm constantes em todas as situações;
- 3º. Um resultado de conclusão extremamente delicada foi obtido no item 5.3.4, no qual foi comparado o aquecimento provocado por uma onda distorcida com o provocado por cada uma de suas harmônicas individualmente. Diz-se que é de conclusão delicada devido à dificuldade de se manter constantes os fatores de influência, tais como: temperatura ambiente, corrente eficaz fornecida pela fonte, estabilização da leitura de temperatura, dentre outros. Portanto, decide-se obter conclusões mais detalhadas somente após as análises dos resultados das medições com o sistema 2;
- 4º. Foi obtido no item 5.3.2 o acréscimo das perdas elétricas devido ao aumento da frequência. Vale enfatizar, neste ponto, que este também está sujeito à influência de todos os fatores que, como já incessantemente dito, dificultaram a obtenção de uma confiabilidade maior nos resultados;
- 5º. Os itens 5.3.2.2 e 5.3.2.3 trabalharam com a obtenção da variação da resistência em função da frequência da corrente fluente pelo resistor. Notou-se uma diferença quando se analisa esse comportamento via curva de aquecimento e via relação tensão/corrente. Da mesma maneira que a confiabilidade da curva de aquecimento está sujeita aos fatores de influência,

a confiabilidade dos valores de tensão e corrente também está sujeita à exatidão do medidor, uma vez que variações de milésimos nos valores de tensão e/ou corrente são capazes de alterar o resultado;

- 6°. A comparação entre os comportamentos resistência em função da frequência no resistor de níquel-cromo e no cabo de cobre ressaltou a sensibilidade do efeito pelicular com relação às propriedades de condutividade elétrica e permeabilidade magnética do material, mas principalmente o brusco aumento da reatância indutiva em função da frequência.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos via medições laboratoriais realizadas para cada conjunto de testes do sistema de medição 1. Também foram realizadas, quando se fazia pertinente, as análises de tais resultados. O capítulo 6 tem a mesma dinâmica do capítulo 5, porém com o foco nos conjuntos de testes realizados com o sistema de medição 2 serão realizadas as análises correspondentes a cada uma das medições apresentadas.

Capítulo 6

Medições e Análise dos Resultados do Sistema 2

*“Quem aceita o mal sem protestar,
coopera realmente com ele.”*

Martin Luther King

6.1 Considerações Iniciais

Este capítulo, a exemplo do anterior, tem por objetivo apresentar os resultados das medições obtidos, bem como as análises dos resultados realizadas, através de cada conjunto de testes ensaiado com o sistema de medição 2. Para tanto, como relata o item 6.2, inicialmente foram definidas as situações a serem medidas.

6.2 Definição das Situações a Serem Medidas

De acordo com o levantamento teórico realizado no capítulo 2, e com as simulações computacionais, cujas análises estão apresentadas no capítulo 4, foram definidos dois conjuntos de testes, da maneira descrita nos subitens a seguir.

É interessante observar que para o sistema 2 foi definida uma menor quantidade de situações a serem medidas, no entanto, as mesmas foram repetidas diversas vezes, com o objetivo de garantir a confiabilidade dos resultados.

6.2.1 Conjunto de Testes 1: Ensaio com Motor de Indução e Inversor

A partir desse grupo de testes tem-se por objetivo comparar as situações detalhadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Situações de ensaio para o sistema 2.

Situação	Carga	Ajuste do Freio	Corrente Eficaz	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)
1	MIT + Freio	Carga máxima	Linear tal que a carga seja máxima	25	75
2	Inversor + MIT + Freio	Carga máxima	Não linear tal que a carga seja máxima		
3	Inversor + MIT + Freio	Menor que a carga máxima	Não linear tal que a corrente seja igual à da situação 1		

Observa-se que, a prioridade de manutenção é para o carregamento, ou seja, os aquecimentos registrados quando da aplicação das situações 1 e 2 serão comparados entre si

levando em consideração que a carga continua a mesma. Já para as situações 1 e 3 os aquecimentos serão comparados levando em consideração que tanto a corrente linear quanto a não linear tenham o mesmo valor eficaz.

Em outras palavras, a primeira comparação objetiva avaliar a variação de aquecimento causada pela substituição de um motor ligado direto à rede por um motor alimentado através de um inversor de frequência, mantendo-se o mesmo trabalho realizado pelo motor. Já a segunda comparação visa avaliar a variação de aquecimento causada pela aplicação de uma corrente não linear ao invés de linear, ambas de mesmo valor eficaz.

6.2.2 Conjunto de Testes 2: Aplicação de Correntes de Variadas Distorções

Para a realização do segundo grupo de ensaios com o sistema 2, foram necessárias duas substituições:

- varivolt por uma fonte programável para geração de sinais arbitrários (vide Figura 3.2);
- o conjunto inversor, motor e freio por um banco de resistores (vide Figura 5.2).

Tais alterações se fizeram necessárias devido ao fato de que o objetivo desse conjunto de testes é a obtenção das curvas de aquecimento quando da variação da magnitude dos harmônicos. Para tanto foi adotada a estratégia de variação de cada harmônico isoladamente, ou seja, quando da variação do 5º harmônico – por exemplo – os outros se mantêm constantes, com magnitudes iguais às da situação base.

A especificação dos valores das magnitudes dos harmônicos, bem como da distorção harmônica total para cada situação, são mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Detalhamento das situações a serem ensaiadas.

Ensaio	Situação	I ₅ %	I ₇ %	I ₁₁ %	I ₁₃ %	DHT (%)
0	Senoidal	0	0	0	0	0
1	Base	20	15	7,8	8,3	27,5
		167,3°	168°	-22,8°	-25,8°	
2	Variação do 5ºh	30	15	7,8	8,3	35,5
3		40	15	7,8	8,3	44,4
4	Variação do 7ºh	20	22,5	7,8	8,3	32,2
5		20	30	7,8	8,3	38,0
6	Variação do 11ºh	20	15	11,7	8,3	28,9
7		20	15	15,6	8,3	30,5
8	Variação do 13ºh	20	15	7,8	12,5	29,0
9		20	15	7,8	16,6	30,9

Após a realização do conjunto de testes 1, observou-se que o acréscimo de perdas dependia do aspecto da forma de onda, ou seja, dependia da quantidade da distorção existente na corrente que circula pelo transformador. Objetivou-se, então, a realização de ensaios com aplicação de correntes de diversas distorções. Para tanto se utilizou a maneira convencional de quantificação de distorção, ou seja, utilizou-se o conceito de harmônicos para a definição de todas as situações.

Nota-se que foi realizada uma situação (0) de aquecimento à corrente senoidal e outra situação, chamada base, de aquecimento provocado por uma corrente de composição harmônica idêntica à apresentada na Tabela 5.2 e na Figura 5.1. Tais situações servirão como parâmetro de comparação para a análise das variações de perdas devido à aplicação das correntes referentes aos ensaios 2 a 9.

Observa-se ainda que somente são variadas as magnitudes dos harmônicos, mantendo-se constantes seus respectivos ângulos, idênticos aos da situação base.

6.3 Resultados das Medições e Análises

O sistema de medição para avaliar o aquecimento do transformador montado, como detalhado no capítulo 3, possibilitou a realização de vários testes. Os mais importantes e, cujos resultados são apresentados aqui, são os mesmos descritos nas 3 situações da Tabela 6.1. Ademais, neste, é exposto o resultado de outra situação, cuja pertinência será abordada no devido tempo.

6.3.1 Resultados das Medições do Conjunto de Testes 1

6.3.1.1 Situação 1: MIT + Freio com Carga máxima

A primeira situação de medição foi obtida através da alimentação do MIT diretamente pelo secundário do transformador. Ainda, nesta, foi colocada, no motor, a maior carga possível.

A condição final desejada para este, e todos os outros, ensaios, foi a obtenção da temperatura de 75 °C no transformador.

Para tanto, as tensões e as correntes registradas, no secundário do transformador, durante o processo de aquecimento compõem a curva de tendência mostrada na Figura 6.1, na qual a cor azul representa a fase A, a cor verde a fase B e a cor vermelha a fase C.

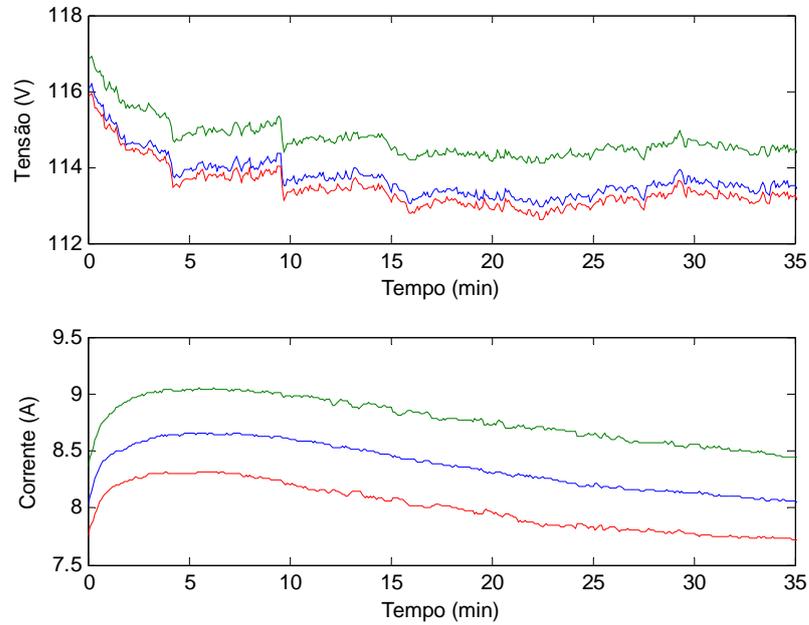


Figura 6.1 – Curvas de tendência de tensão e corrente.

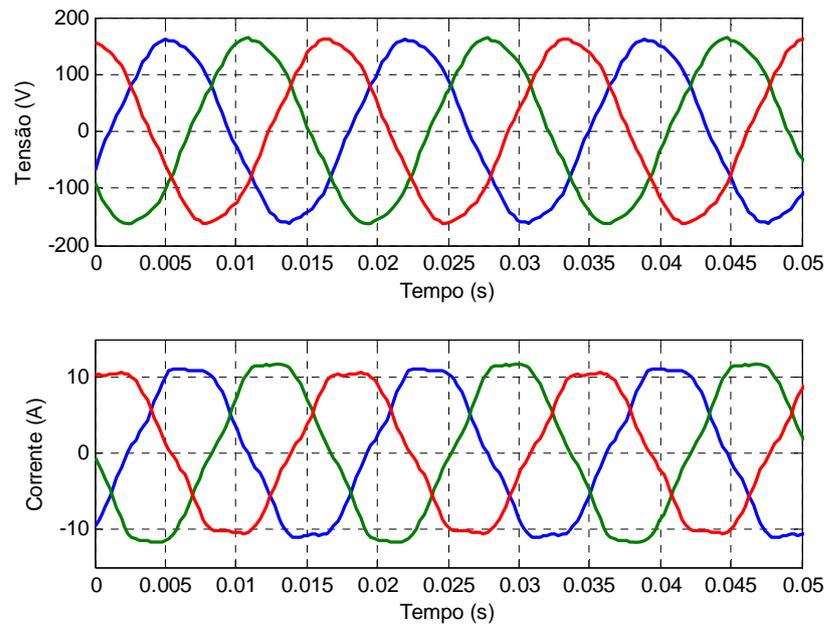


Figura 6.2 – Formas de onda de tensão e corrente no secundário.

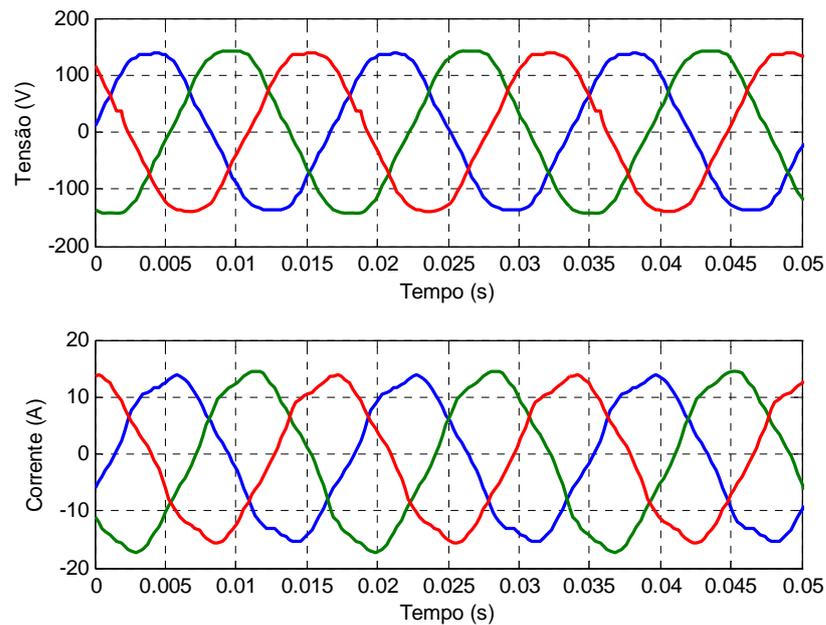


Figura 6.3 – Formas de onda de tensão e corrente no primário.

Observa-se certo desequilíbrio tanto entre as tensões quanto entre as correntes. Este é devido tanto ao varivolt quanto ao próprio transformador. A título ilustrativo, são mostradas na Figura 6.2 e na Figura 6.3 as formas de onda de tensão e corrente no secundário e no primário do transformador, respectivamente. Por fim, e mais importante, como mostrado na Figura 6.4, foi registrada a temperatura no transformador.

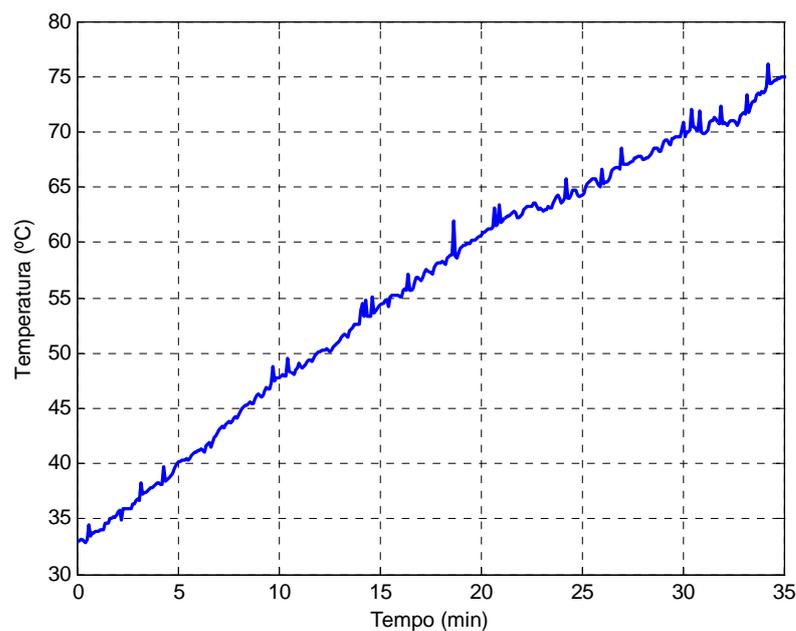


Figura 6.4 – Curva de aquecimento do transformador.

Nota-se que o aquecimento durou aproximadamente 35 minutos. Foi omitido o início do aquecimento (de aproximadamente 27 °C até 33 °C) para a obtenção de uma melhor visualização do resultado. Vale salientar ainda que, para a medição de temperatura, o transformador foi inserido dentro de uma caixa de isopor.

Uma análise mais apropriada dos resultados dessa situação somente poderá ser feita em comparação com outras situações, como seguem nos próximos itens.

6.3.1.2 Situação 2: Inversor + MIT + Freio com Carga máxima

A situação 2 foi realizada através da inserção de um inversor de frequência entre o secundário do transformador e o MIT e, deveria ser mantida a condição de carga máxima.

Durante a realização dessa experiência obteve-se as curvas de tendência mostradas na Figura 6.5.

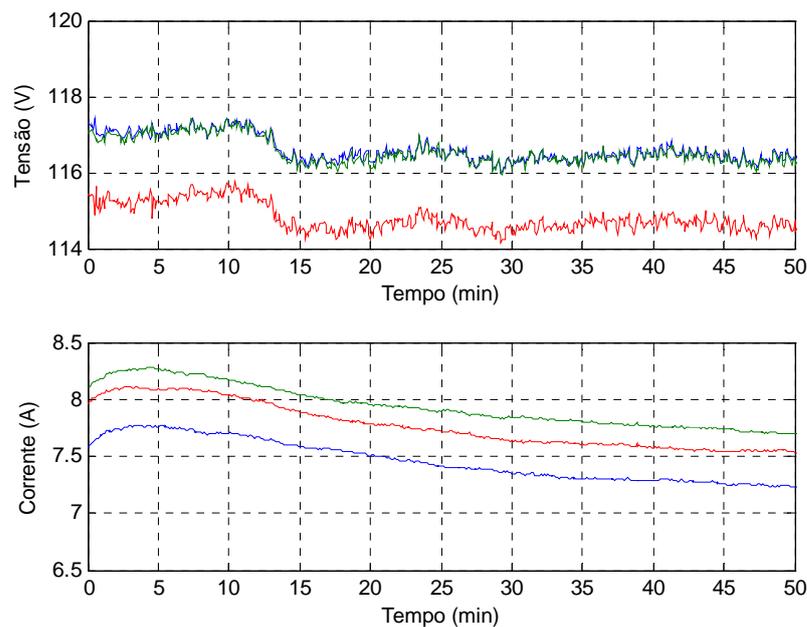


Figura 6.5 – Curvas de tendência de tensão e corrente.

Da mesma maneira, são apresentadas as tensões e correntes registradas no secundário e no primário do transformador, respectivamente pelas Figura 6.6 e Figura 6.7.

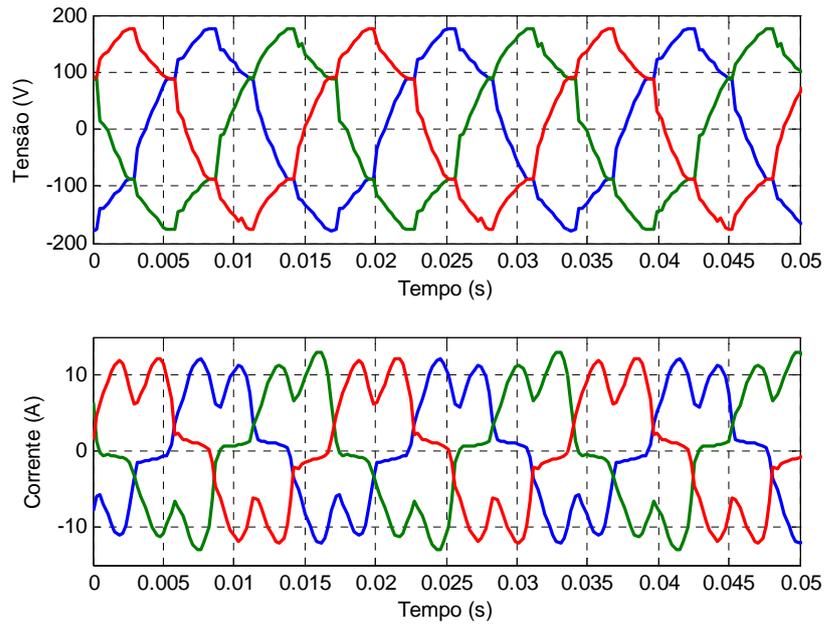


Figura 6.6 – Formas de onda de tensão e corrente no secundário.

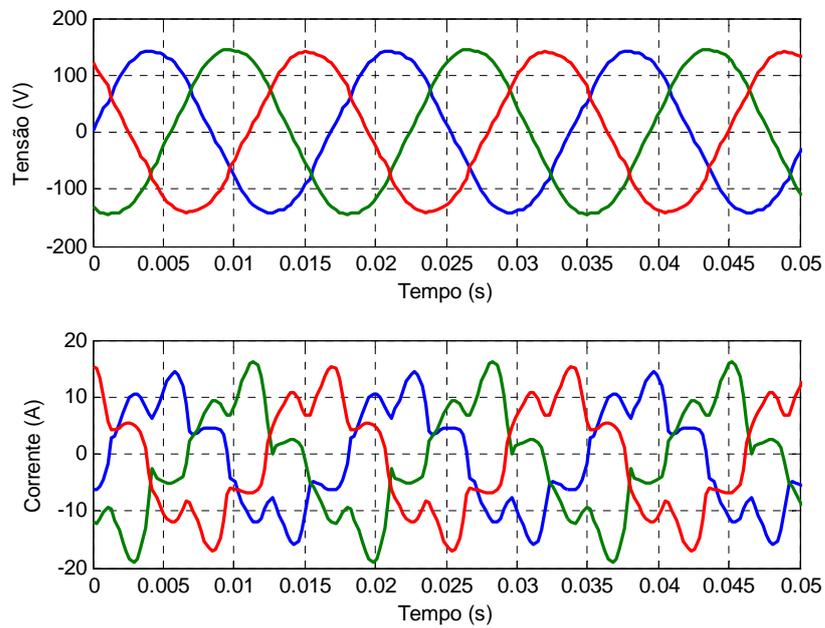


Figura 6.7 – Formas de onda de tensão e corrente no primário.

Foram registrados, no transformador, os valores de temperatura a cada 5 segundos, os quais geraram a curva de aquecimento mostrada na Figura 6.8.

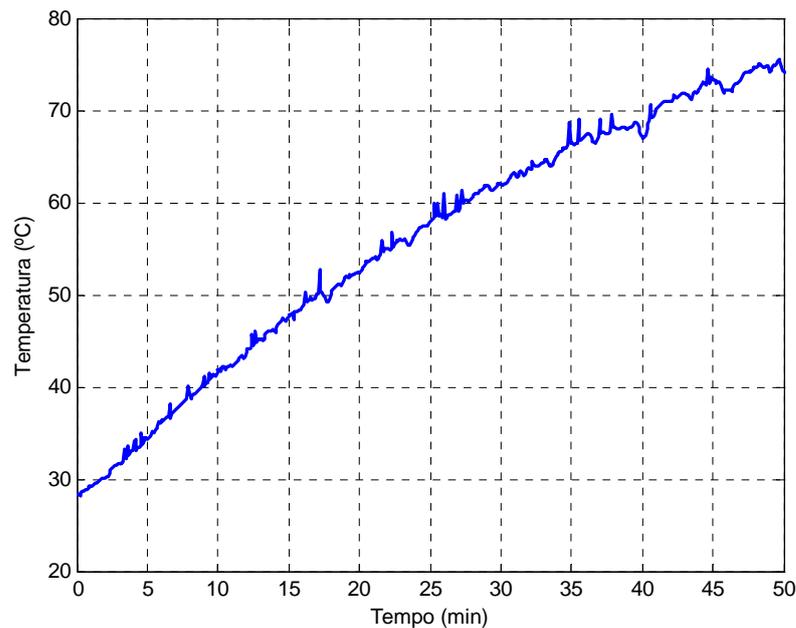


Figura 6.8 – Curva de aquecimento do transformador.

Observa-se que o tempo de aquecimento foi de aproximadamente 50 minutos, consideravelmente maior do que o tempo para a situação 1. Este fato ocorreu devido ao valor eficaz da corrente ter diminuído (Figura 6.1 *versus* Figura 6.5) da situação 1 para a situação 2. Explica-se essa diminuição pelo fato de que, apesar de o inversor consumir uma corrente distorcida, ele também reduz o ângulo de deslocamento entre tensão e corrente aproximadamente de 35° a 14° . Em outras palavras, para esse sistema de medição, quando da inserção do inversor de frequência a corrente eficaz diminuiu, uma vez que o fator de potência aumentou.

Desta maneira é totalmente inviável, nos termos previstos, a comparação entre as situações 1 e 2. Inviável da mesma forma, é a realização da situação 3, na qual a partir da situação 2 diminuía-se a carga do MIT para igualar a corrente eficaz não linear com a linear. Em contrapartida, o que se torna interessante é a diminuição da carga da situação 1 para aí sim igualar os valores eficazes.

Assim sendo, a situação 3 foi substituída, da maneira descrita no item 6.3.1.3.

6.3.1.3 Situação 3 – MIT + Freio – Carga Menor que a Máxima

Para a obtenção dessa situação de medição, a carga do motor foi reduzida de tal maneira a igualar a corrente registrada no secundário do transformador à registrada quando

da situação 2. Ou seja, o objetivo é comparar o aquecimento provocado por uma corrente distorcida frente ao provocado por uma corrente senoidal, ambas de mesmo valor eficaz.

Dessa forma, a Figura 6.9 traz as curvas de tendência de tensão e corrente.

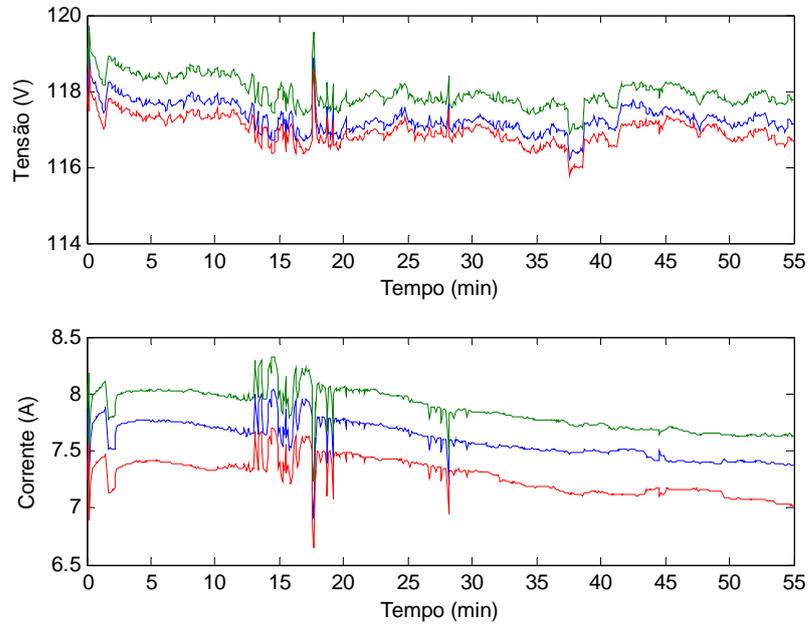


Figura 6.9 – Curvas de tendência de tensão e corrente.

Analogamente, a título de comparação, são mostradas (Figura 6.10 e Figura 6.11) as formas de onda de tensão e corrente no secundário e no primário do transformador.

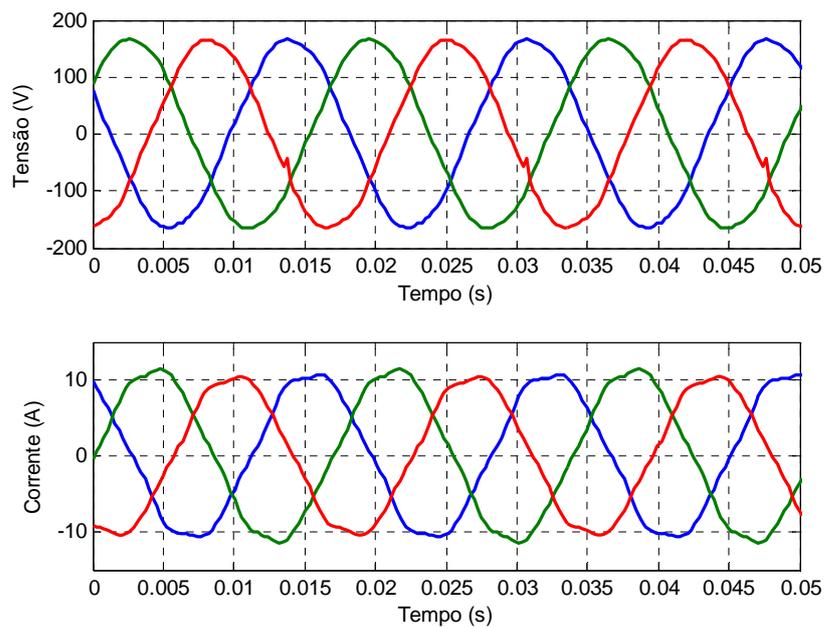


Figura 6.10 – Formas de onda de tensão e corrente no secundário.

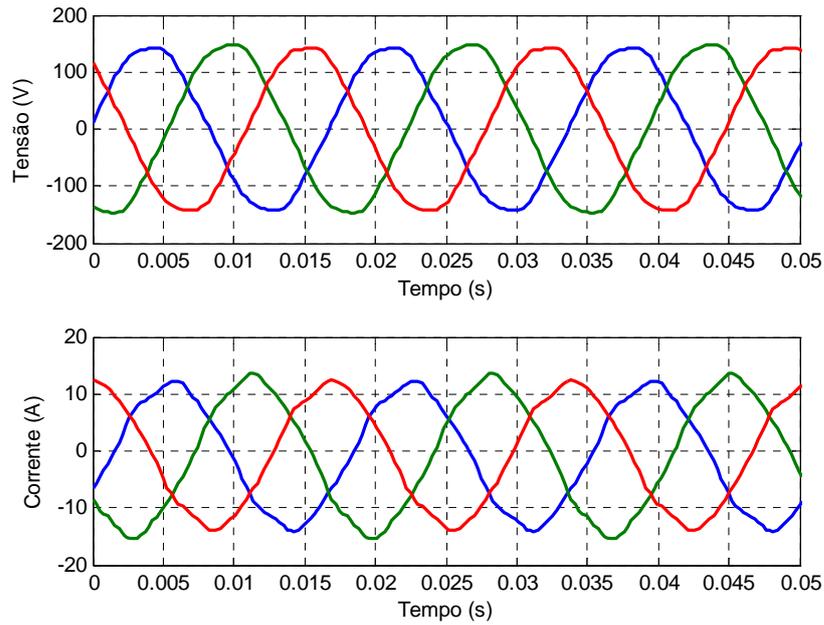


Figura 6.11 – Formas de onda de tensão e corrente no primário.

Também, como mais importante objeto de comparação foi registrada a temperatura do transformador ao longo do processo de aquecimento, curva tal que pode ser visualizada na Figura 6.12.

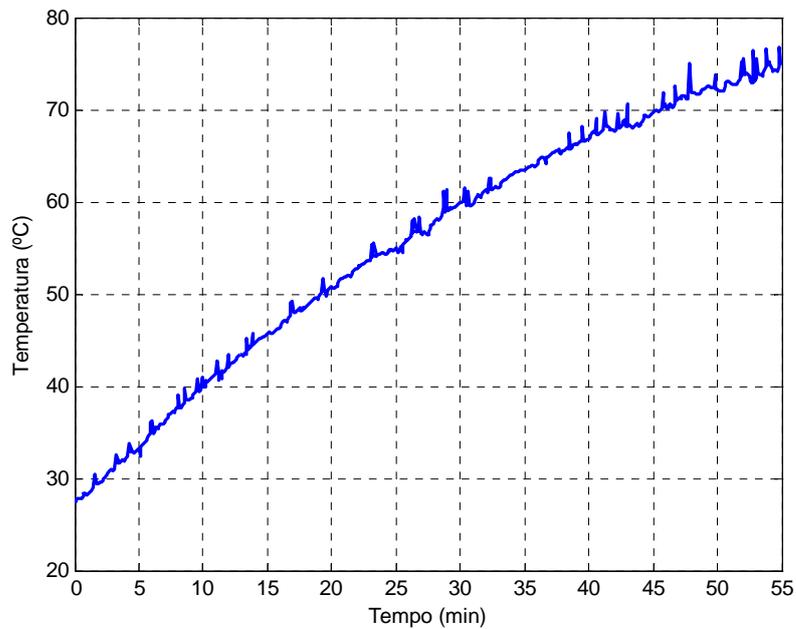


Figura 6.12 – Curva de aquecimento do transformador.

Observa-se que o tempo de aquecimento foi maior do que quando da situação não linear, ou seja, este fato implica que as perdas aumentam quando da distorção da forma de onda da corrente. Tal comportamento fica melhor evidenciado quando se compara as curvas de aquecimento obtidas através dos ensaios das situações 2 (não linear) e 3 (linear) em um mesmo gráfico (Figura 6.13).

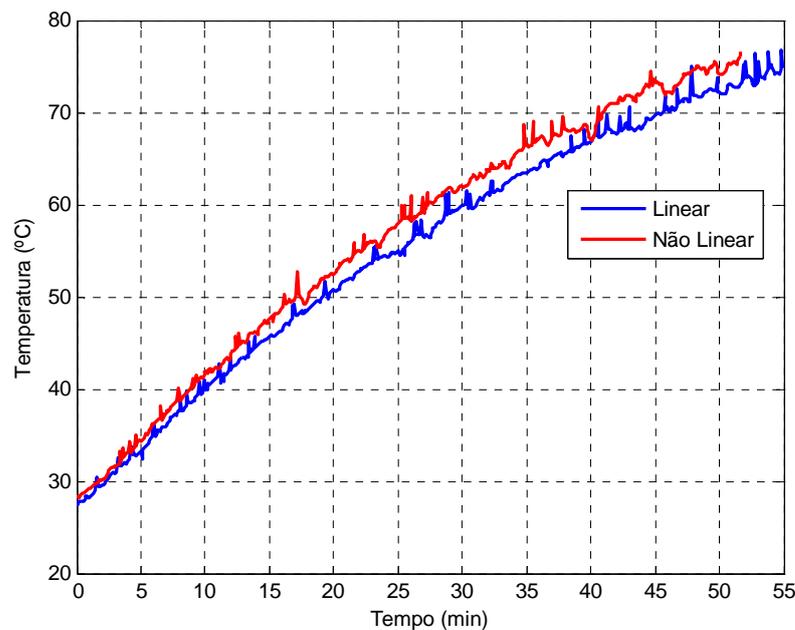


Figura 6.13 – Curvas de aquecimento - Situação 3 (linear) versus Situação 2 (não linear)

Como já explorado nas medições com o sistema 1, existe a dificuldade, devido à instabilidade do transmissor de temperatura, de se trabalhar com os valores adquiridos durante o ensaio, portanto lança-se mão de técnicas de regressão.

A princípio, para essas curvas de aquecimento, optou-se por trabalhar com uma regressão linear, de tal maneira que os resultados analíticos e gráficos são mostrados na expressão (6.1) e na Figura 6.14.

$$\begin{aligned} T_3 &= T_{linear} = 0,8614 \cdot t + 31,692 \\ T_2 &= T_{nao-linear} = 0,9234 \cdot t + 32,363 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Percebe-se que o resultado obtido não se aproxima muito bem da curva original, portanto optou-se por aumentar para 2ª a ordem da regressão, ou seja, resolveu-se trabalhar com um polinômio de ordem 2. Da mesma forma os resultados analíticos e gráficos são mostrados na expressão (6.2) e na Figura 6.15.

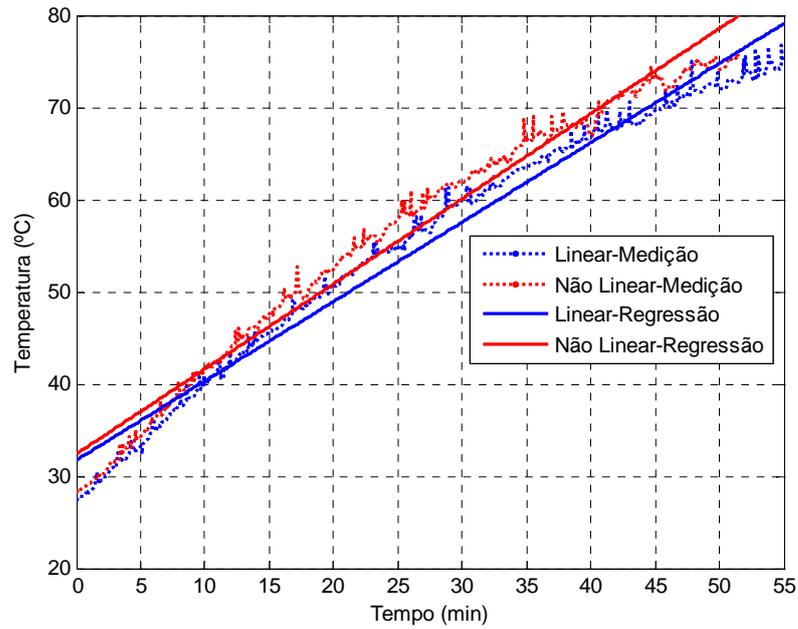


Figura 6.14 – Regressão linear.

$$T_3 = T_{linear} = -0,00874 \cdot t^2 + 1,34222 \cdot t + 27,29182 \tag{6.2}$$

$$T_2 = T_{nao-linear} = -0,01025 \cdot t^2 + 1,45330 \cdot t + 27,80900$$

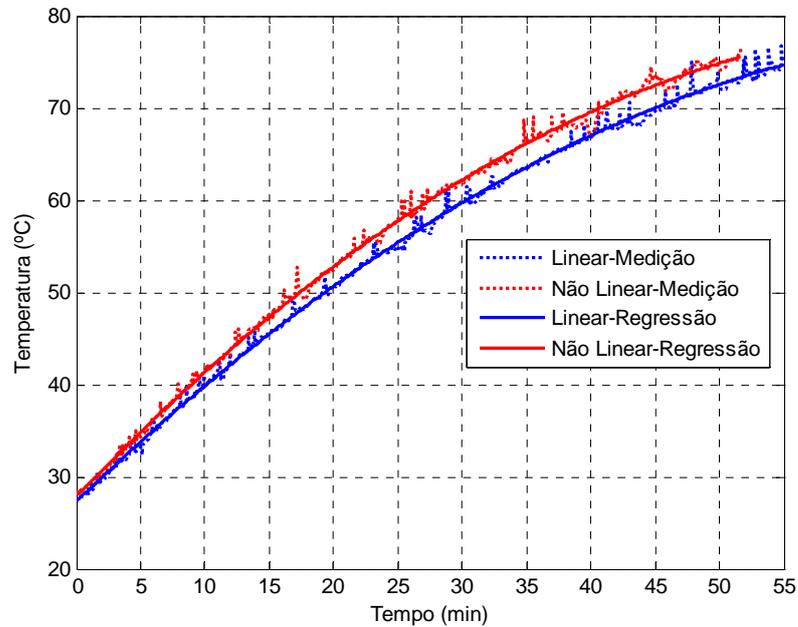


Figura 6.15 – Regressão polinomial.

Observa-se claramente que existe grande semelhança entre a curva regredida e a curva original, de tal forma que se pode, sem prejuízo algum, trabalhar com as expressões

de T_2 e T_3 para quaisquer análises dependentes dessas, como é o caso do item 6.3.2, para o qual é analisado o acréscimo das perdas.

6.3.2 Análises dos Resultados no Conjunto de Testes 1

De posse do comportamento da temperatura em função do tempo para cada uma das duas situações ensaiadas e, admitindo-se a temperatura ambiente constante e idêntica durante os ensaios, podem-se estimar as perdas, para cada situação, da seguinte maneira:

$$P_n = k \frac{dT}{dt} \quad (6.3)$$

Utilizando o mesmo raciocínio aplicado para o sistema 1, pode-se obter o acréscimo de perdas (A_p) através da análise comparativa entre as duas situações em questão, ou seja, situação de linearidade frente à situação de não linearidade. Tal avaliação pode ser feita da seguinte maneira:

$$A_p = \frac{P_2}{P_3} = \frac{\frac{dT_2}{dt}}{\frac{dT_3}{dt}} \quad (6.4)$$

Dessa maneira, a comparação das perdas causadas pela corrente da situação 2 (não linear) em relação à corrente da situação 3 (linear) é realizada da seguinte forma:

$$A_{p-2/3} = \frac{P_2}{P_3} = \frac{\frac{d(-0,01025 \cdot t^2 + 1,45330 \cdot t + 27,80900)}{dt}}{\frac{d(-0,00874 \cdot t^2 + 1,34222 \cdot t + 27,29182)}{dt}} = \frac{-0,02050 \cdot t + 1,45330}{-0,01748 \cdot t + 1,34222}$$

Avaliando a relação no instante de maior derivada, ou seja, no instante 0, tem-se:

$$A_{p-2/3} = \frac{P_2}{P_3} = \frac{1,45330}{1,34222} = 1,0828$$

De acordo com esse resultado obteve-se, através da medição do aquecimento, que as perdas elétricas do transformador quando da alimentação do inversor são 8,28 % maiores do que as perdas quando da alimentação direta do motor.

Observa-se que o procedimento de análise teórica apresentado no capítulo 2, mais especificamente no item 2.4, resultou na obtenção da máxima corrente eficaz que o transformador é capaz de suprir quando da existência da distorção especificada. Por outro lado, o procedimento de cálculo a partir das medições de temperatura via ensaios

laboratoriais, conduz à obtenção do acréscimo das perdas do transformador quando submetido à circulação da corrente elétrica igualmente distorcida.

Ainda mais, na análise teórica para que se obtenha a corrente máxima suportável é necessário que se mantenha (quando da substituição da carga linear pela não linear) as perdas elétricas do transformador constantes. Já no procedimento prático, para a obtenção do acréscimo das perdas, é necessário que se mantenham as correntes eficazes iguais, para as quando dos ensaios das situações linear e não linear.

Dessa forma é possível avaliar o impacto da substituição de cargas lineares por não lineares de duas maneiras: uma, convencional, através do cálculo teórico, e outra através de um procedimento empírico simplificado, da maneira abordada neste trabalho. No entanto, observa-se que os resultados da análise teórica e da análise prática, quando comparados entre si, revelam uma diferença considerável. Em outras palavras, quantitativamente a análise teórica resulta em uma diminuição da corrente máxima suportável de aproximadamente 12%, ao passo que a análise prática conduz a uma conclusão de que as perdas no transformador aumentam cerca de 8%, para a mesma situação de distorção.

Fato é que as diferenças de abordagem entre a análise teórica e prática aqui comentadas não possibilitam uma análise comparativa absoluta desses resultados, tem-se que partir para uma análise comparativa ponderada, com base nas especificações de cada sistema elétrico, uma vez que a análise prática considera a manutenção do valor de corrente eficaz entre as situações linear e não linear. Uma análise mais criteriosa será abordada no capítulo 7.

6.3.3 Resultados das Medições do Conjunto de Testes 2

Foram realizadas medições ajustando-se a fonte para as 10 situações descritas na Tabela 6.2, no entanto não se faz necessária a apresentação das curvas de aquecimento registradas durante o ensaio com cada uma delas. Opta-se aqui pela apresentação das formas de onda e curvas de aquecimento de apenas três situações, a saber: base, 2 e 3. Em contrapartida, os resultados de interesse serão sim apresentados para todas as situações.

A princípio são mostradas na Figura 6.16 as formas de onda da tensão ajustadas na fonte programável para o ensaio de tais situações.

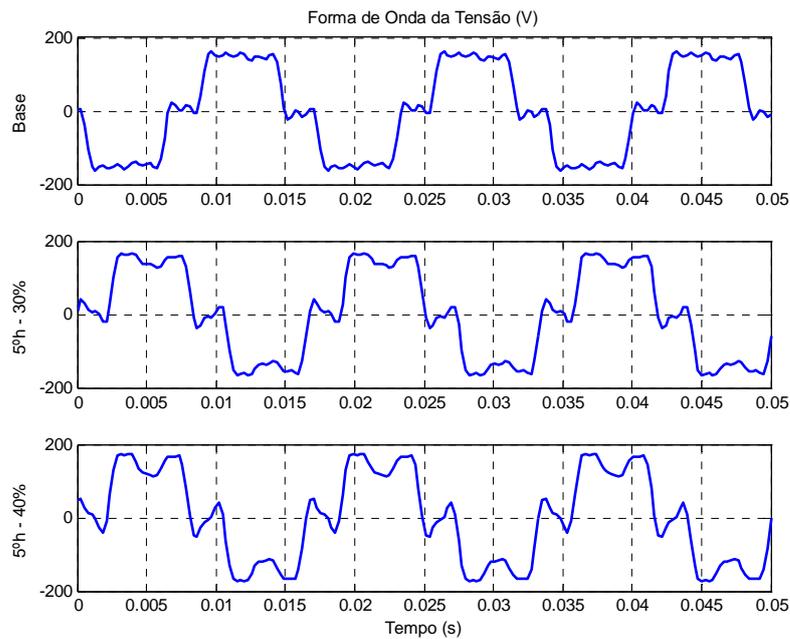


Figura 6.16 – Formas de onda da tensão aplicada pela fonte.

Complementarmente, a título ilustrativo, é mostrado na Figura 6.17 o espectro de amplitude referente às tensões aplicadas em cada uma das situações.

Observa-se que, ao passo que o quinto harmônico teve seu valor acrescido nas situações 2 e 3, os valores dos outros harmônicos tiveram que ser diminuídos, objetivando a igualdade do valor eficaz total da onda distorcida para as três situações. O mesmo comportamento pode ser notado quando da comparação das situações 4 a 9 em relação à situação base. Também a título ilustrativo, as três figuras abaixo apresentam os seguintes espectros harmônicos:

- Figura 6.18: comparação entre a situação base e as situações de variações do 7º harmônico (4 e 5);
- Figura 6.19: comparação entre a situação base e as situações de variações do 11º harmônico (6 e 7);
- Figura 6.20: comparação entre a situação base e as situações de variações do 13º harmônico (8 e 9).

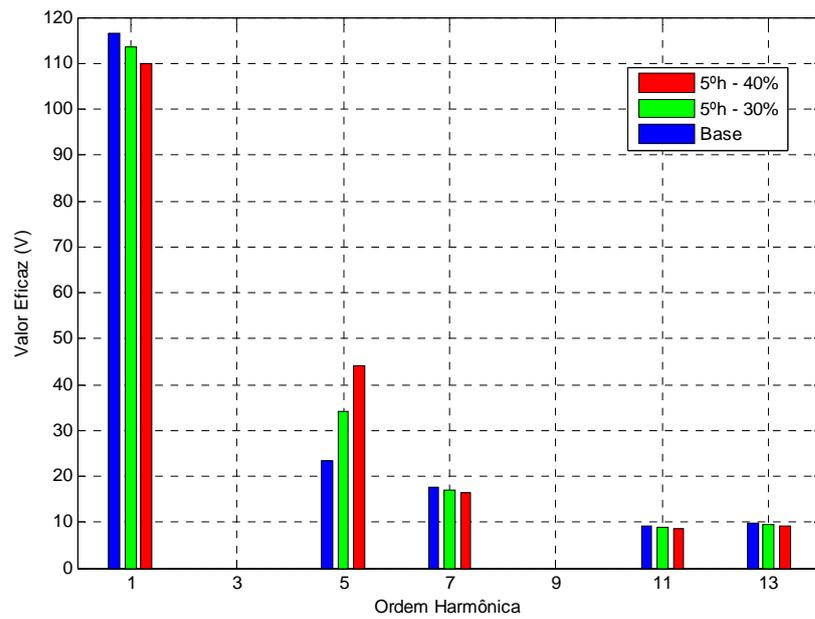


Figura 6.17 – Espectro harmônico de amplitude de tensão para as três situações.

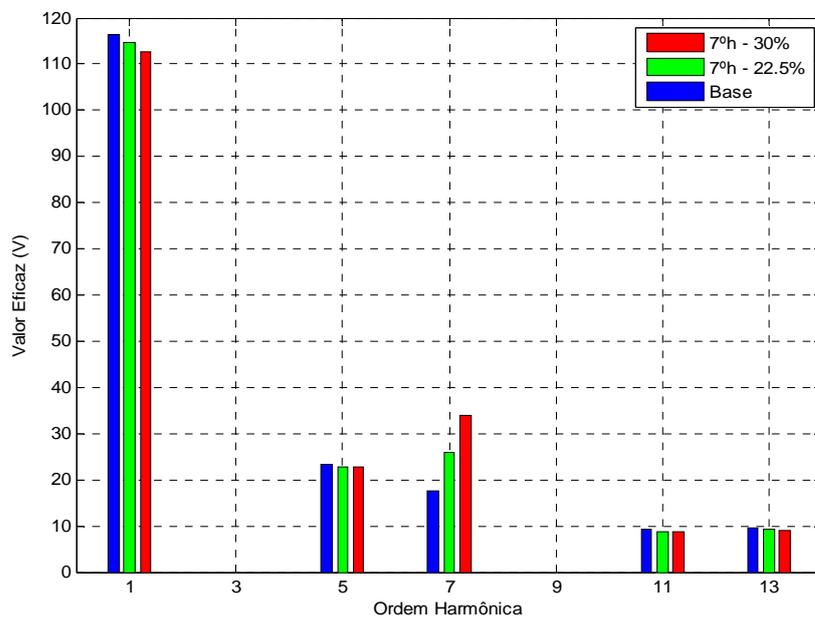


Figura 6.18 - Espectro harmônico de amplitude de tensão para as situações 1, 4 e 5.

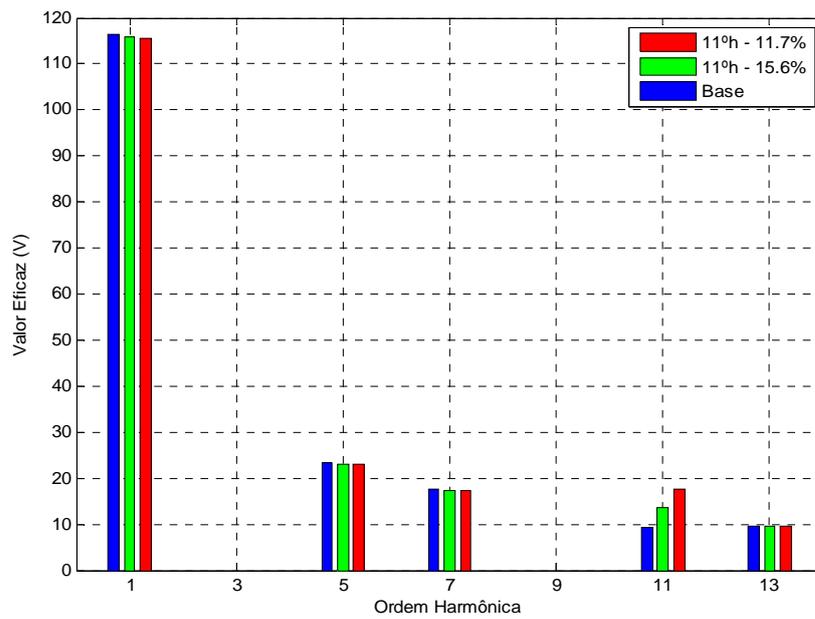


Figura 6.19 - Espectro harmônico de amplitude de tensão para as situações 1, 6 e 7.

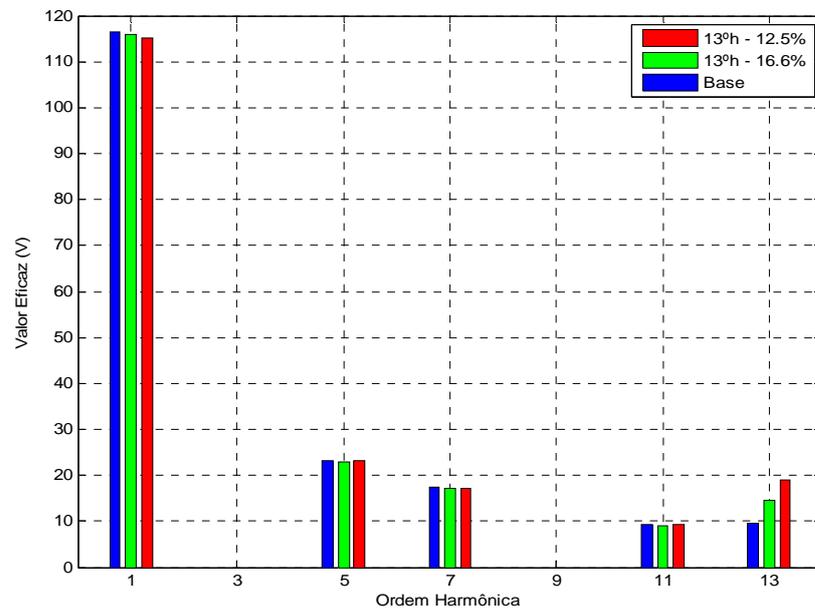


Figura 6.20 - Espectro harmônico de amplitude de tensão para as situações 1, 8 e 9.

Como a principal grandeza a ser analisada é a temperatura, é importante mostrar as curvas de aquecimento registradas durante os ensaios das situações. Tais curvas são apresentadas pelas três figuras a seguir que representam o aquecimento registrado apenas durante as situações base, 2 e 3 respectivamente.

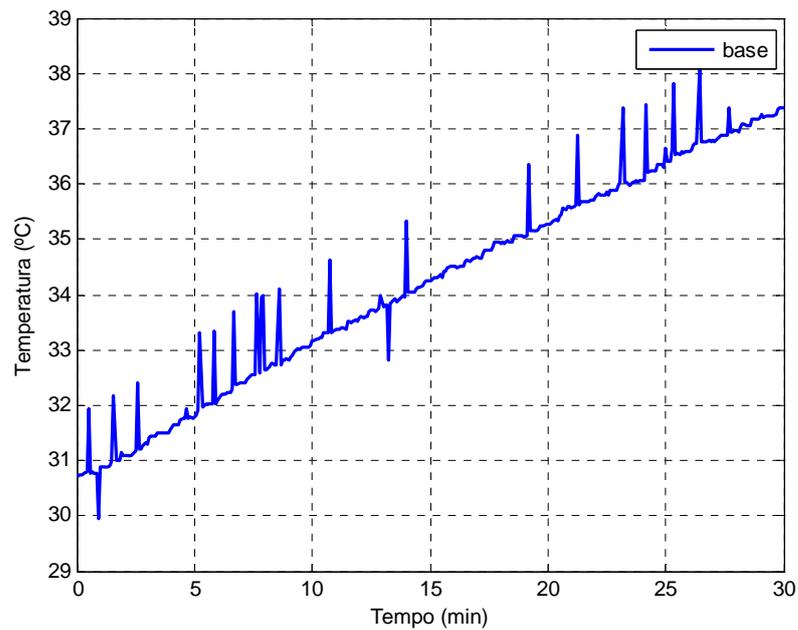


Figura 6.21 – Curva de aquecimento registrada na situação base.

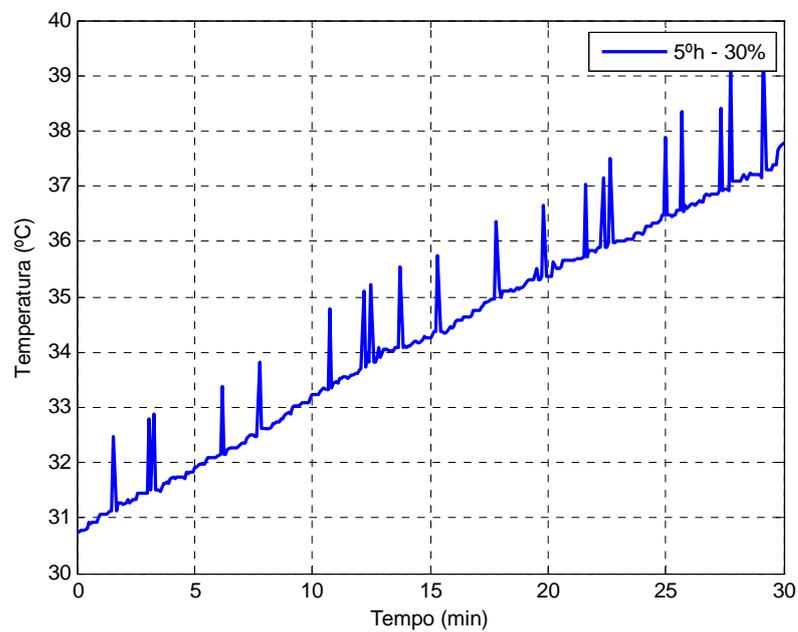


Figura 6.22 – Curva de aquecimento registrada na situação 2.

Como o aspecto das curvas de aquecimento, durante o período de medição, apresentou um crescimento praticamente linear, optou-se por tratar tais curvas de maneira linear, ou seja, obtendo as expressões (6.5) através de regressão linear.

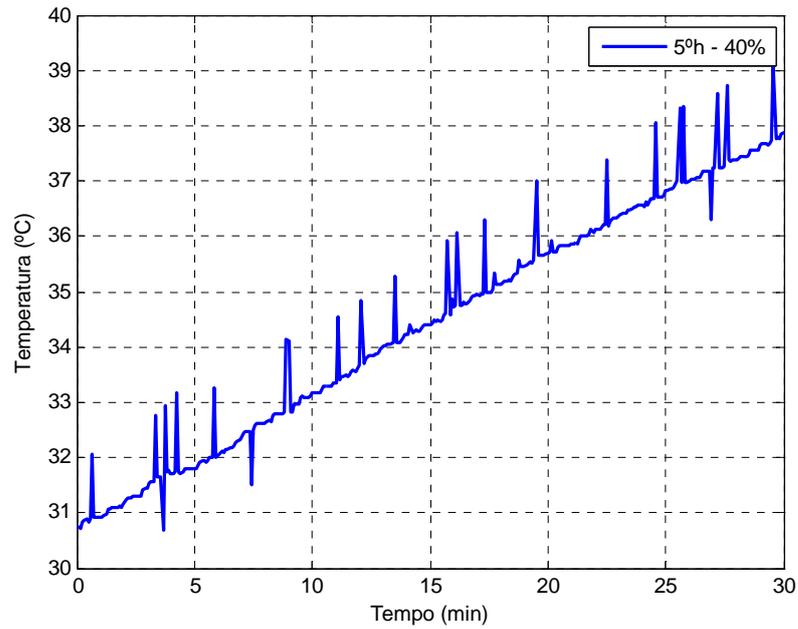


Figura 6.23 – Curva de aquecimento registrada na situação 3.

$$\begin{aligned}
 T_{base} &= 0,2337t + 30,8626 \\
 T_{5h-30\%} &= 0,2414t + 30,8964 \\
 T_{5h-40\%} &= 0,2436t + 30,7813
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

Complementarmente, de acordo com a Figura 6.24, são traçadas as curvas de aquecimento correspondentes às expressões (6.5).

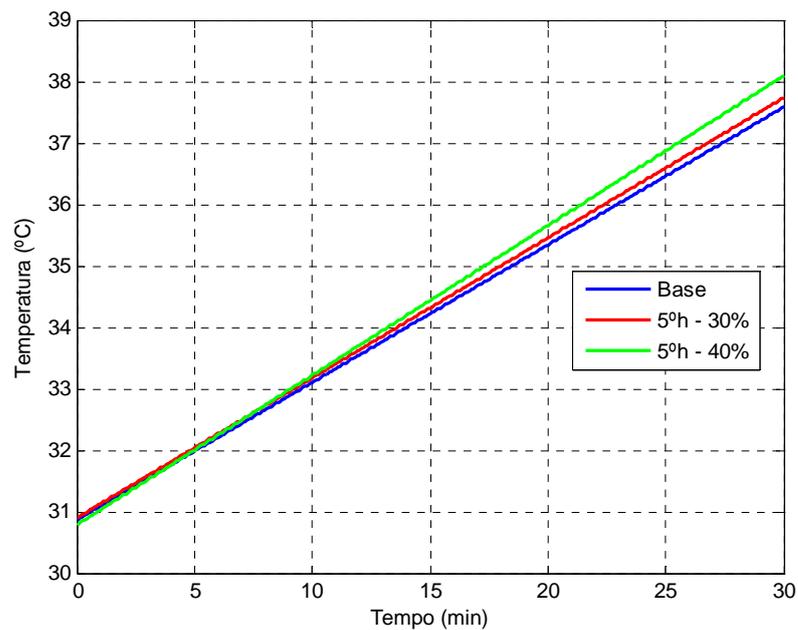


Figura 6.24 – Curvas de aquecimento traçadas a partir da regressão linear.

De posse dessas expressões, bem como das obtidas para as outras 7 situações (0 e 4 a 9) é possível realizar uma análise do acréscimo das perdas, como apresentado no item 6.3.4.

6.3.4 Análises dos Resultados do Conjunto de Testes 2

O comportamento linear das expressões (6.5) foi obtido para todas as situações ensaiadas. No entanto, a exemplo de análises anteriores, para se obter as perdas correspondentes ao aquecimento utiliza-se da derivada de tais expressões, fazendo-se necessária a análise apenas do coeficiente angular das mesmas. Esses coeficientes são mostrados na Tabela 6.3.

Ademais, para se obter o acréscimo das perdas devem-se relacionar as perdas de cada situação com as perdas de uma situação de referência. No caso do presente conjunto de testes, tais relações são feitas de duas maneiras:

- Acréscimo de perdas para cada situação com relação à situação senoidal;
- Acréscimo de perdas para cada situação com relação à situação base (1);

Os valores obtidos para o acréscimo de perdas com referência tanto à situação senoidal como à situação base também são mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Coeficientes angulares e acréscimo de perdas para todas as situações.

Ensaio	Situação	DHT (%)	Coeficientes Angulares	Acréscimo de Perdas (A_p) em Relação à Situação:	
				Senoidal (%)	Base (%)
0	Senoidal	0	0,2237	0	-4,47
1	Base	27,5	0,2337	4,47	0
2	Variação do 5 ^o h	35,5	0,2414	7,91	3,29
3		44,4	0,2436	8,90	4,23
4	Variação do 7 ^o h	32,2	0,2401	7,33	2,74
5		38,0	0,2423	8,31	3,68
6	Variação do 11 ^o h	28,9	0,2361	5,54	1,03
7		30,5	0,2373	6,08	1,54
8	Variação do 13 ^o h	29,0	0,2366	5,77	1,24
9		30,9	0,2393	6,97	2,40

Com o objetivo de se realizar uma melhor análise apresentam-se duas figuras comparativas entre a distorção harmônica e o acréscimo de perdas, a primeira (Figura 6.25) com relação à situação senoidal e a segunda (Figura 6.26) com relação à situação base. Vale

observar que em ambas as figuras foram acrescentados gráficos indicativos da relação entre o acréscimo de perdas e a distorção harmônica.

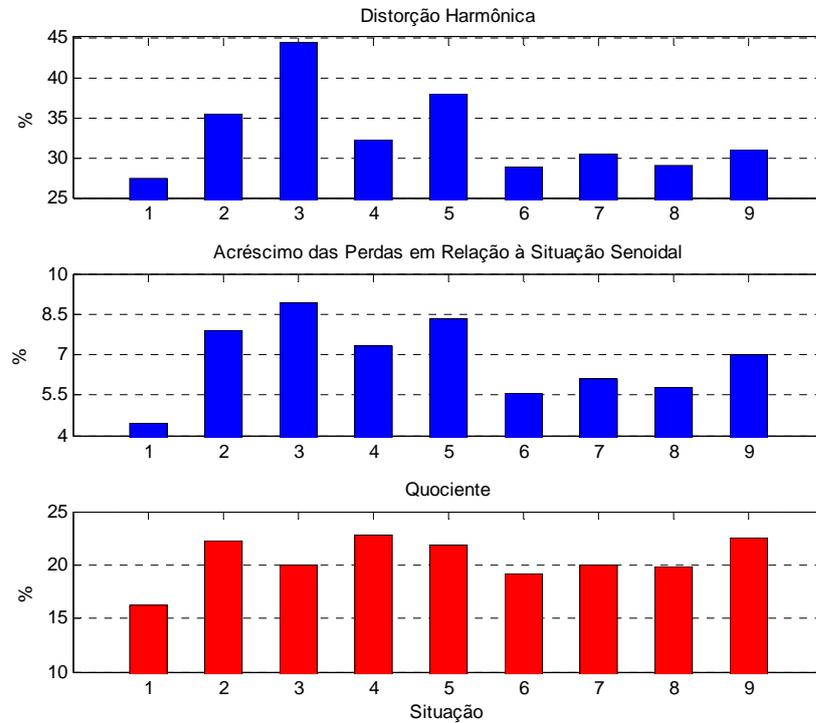


Figura 6.25 – Distorção harmônica versus acréscimo de perdas em relação à situação senoidal.

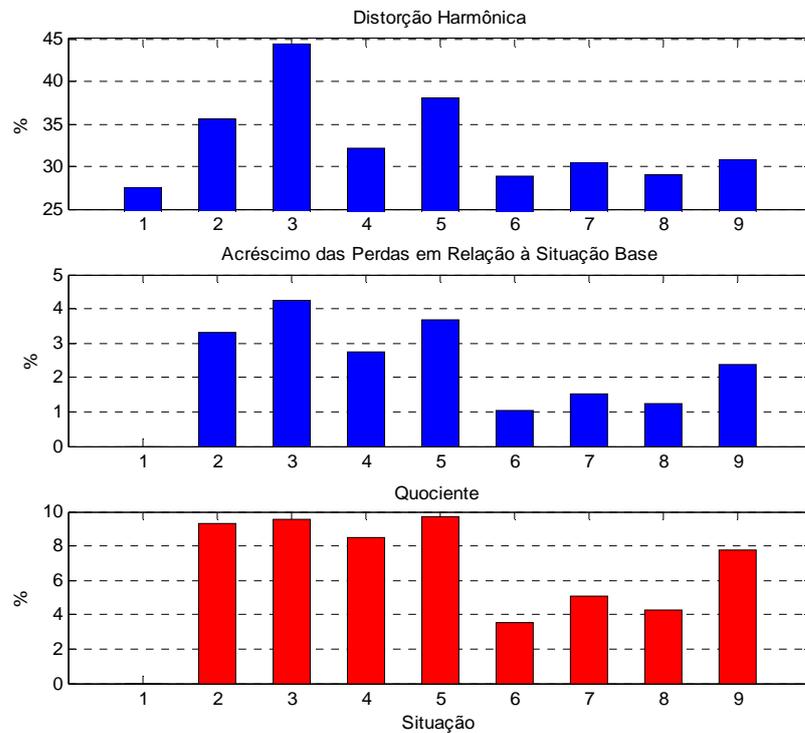


Figura 6.26– Distorção harmônica versus acréscimo de perdas em relação à situação base.

Observa-se tanto na Figura 6.25 quanto na Figura 6.26, que em consequência do aumento da distorção harmônica houve o aumento do acréscimo das perdas. Em outras palavras, por exemplo, da situação 2 para 3 tanto a distorção quanto o acréscimo das perdas aumentaram. Este comportamento pode ser notado também nas situações 4 para 5, 6 para 7 e 8 para 9.

É interessante observar, no gráfico do quociente (acrécimo de perdas em relação à situação senoidal/distorção harmônica total) representado pelas barras vermelhas na Figura 6.25, que o quociente da situação 2 foi maior do que o da 3. Esse fato significa que da situação 2 para a 3 a distorção aumentou mais do que o acréscimo de perdas em relação à situação senoidal.

Uma possível justificativa se baseia na análise da Figura 6.17, na qual nota-se que ao passo que o 5º aumenta os outros diminuem, em menor escala. No entanto da situação 2 para a 3 são diminuídas amplitudes de três harmônicos de maior ordem do que o 5º harmônico. Assim sendo, tais diminuições implicam para que o aumento da distorção harmônica total tenha menor influência no quociente da Figura 6.25 do que quando se analisa, em comparação, as situações: 4 e 5; 6 e 7; 8 e 9. Destas, a primeira comparação também apresentou um decréscimo no quociente, porém as duas outras comparações resultaram em aumentos, sendo ainda o aumento da última (situação 8 para 9) maior que o aumento do quociente (acrécimo de perdas/distorção harmônica) da situação 7 em comparação com a situação 6.

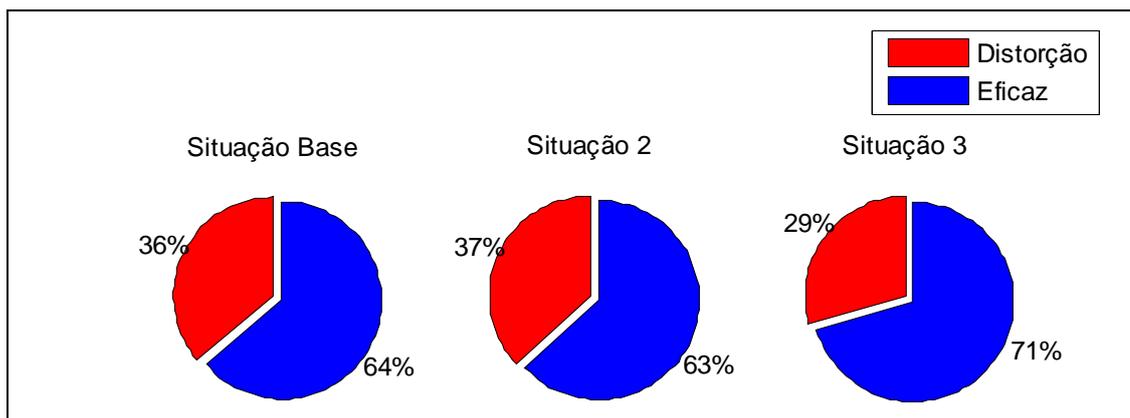
Diferentemente, quando se observa a Figura 6.26 nota-se que todos os quocientes (acrécimo de perdas em relação à situação base/distorção harmônica total) aumentam. Ainda observa-se que quanto maior a ordem do harmônico alterado, maior o aumento do quociente. Comportamento que pode ser justificado, a exemplo da análise dos resultados da Figura 6.25, pelo fato de que ao passo que um harmônico tem seu valor acrescido os outros têm que ter seus valores diminuídos, devido à necessidade de se ter o mesmo valor eficaz de tensão aplicada em todos os ensaios.

Outra análise importante diz respeito à divisão do acréscimo das perdas em um parcela correspondente ao aumento do valor eficaz entre componente fundamental e onda distorcida e outra correspondente ao aumento da distorção harmônica em si. Tal análise é idêntica à realizada no item 5.3.6, mais precisamente mostrada na Figura 5.25. Dessa forma, aplicando-se a mesma metodologia às 9 situações de diferentes distorções ensaiadas, obtém-se a Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Divisão das perdas entre distorção da forma de onda e acréscimo de valor eficaz.

Ensaio	Situação	DHT (%)	Acréscimo Percentual de Perdas devido ao Aumento de:	
			Distorção (%)	Valor Eficaz (%)
1	Base	27,5	36,18	63,82
2	Variação do 5ºh	35,5	36,88	63,12
3		44,4	29,47	70,53
4	Variação do 7ºh	32,2	39,73	60,27
5		38,0	34,93	65,07
6	Variação do 11ºh	28,9	38,73	61,27
7		30,5	37,95	62,05
8	Variação do 13ºh	29,0	39,30	60,70
9		30,9	40,41	59,59

Para se realizar uma melhor análise, podem-se comparar inicialmente as situações 1, 2 e 3, através do auxílio da Figura 6.27.

**Figura 6.27 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 2 e 3.**

Observa-se que, da situação 2 para 3, apesar do aumento da DHT, ocorreu uma diminuição da parcela do acréscimo de perdas correspondente à distorção. Esse comportamento se deve ao fato de que simultaneamente ao aumento da DHT ocorre uma diminuição do valor da componente fundamental, para que o valor eficaz seja mantido o mesmo. Uma vez que a componente fundamental tem seu valor decrescido, a diferença entre sua magnitude e o valor eficaz total aumenta, fazendo com que o acréscimo de perdas sofra maior impacto. Em contrapartida a DHT aumenta, o que faz com que o acréscimo de perdas devido à distorção também aumente. Quando se mescla esses dois comportamentos nota-se que, da situação 2 para 3, a variação do valor eficaz causa mais impacto no acréscimo de perdas do que o aumento da DHT. Já da situação base para a situação 2, o aumento da DHT causa mais impacto no acréscimo das perdas do que o aumento do valor eficaz. Tal

comportamento evidencia a existência de uma relação de compromisso entre as duas grandezas analisadas, que pode ser também observada quando da comparação das outras situações, como mostram as três figuras a seguir, a saber:

- Figura 6.28: Divisão das perdas entre distorção da forma de onda e acréscimo de valor eficaz para as situações 1, 4 e 5;
- Figura 6.29: Divisão das perdas entre distorção da forma de onda e acréscimo de valor eficaz para as situações 1, 6 e 7;
- Figura 6.30: Divisão das perdas entre distorção da forma de onda e acréscimo de valor eficaz para as situações 1, 8 e 9;

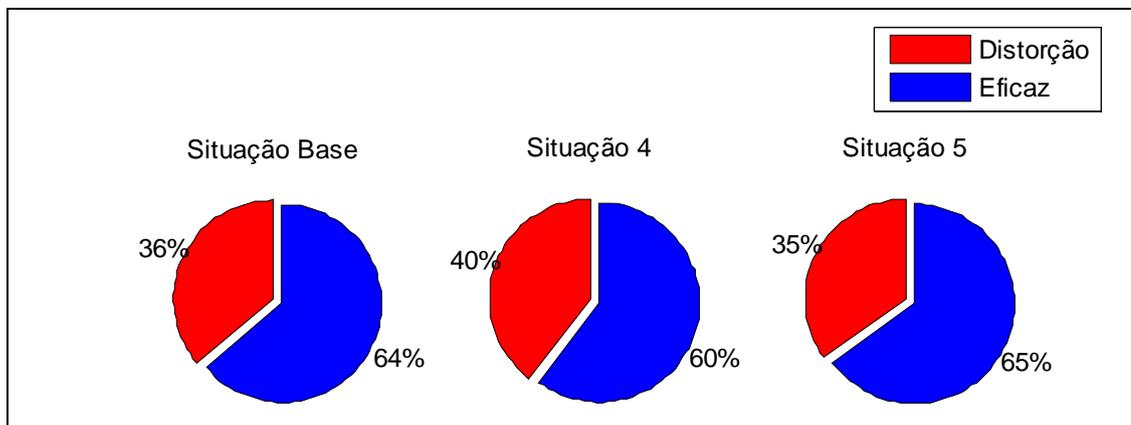


Figura 6.28 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 4 e 5.

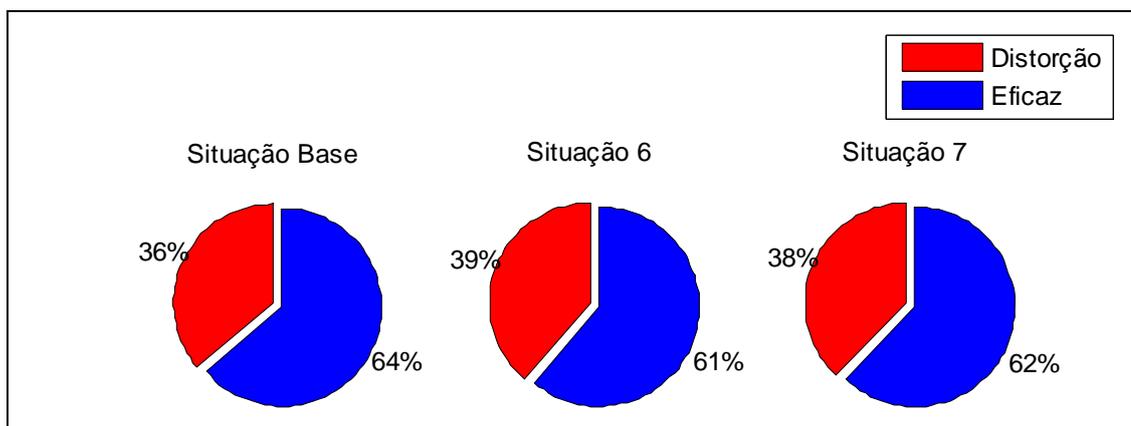


Figura 6.29 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 6 e 7.

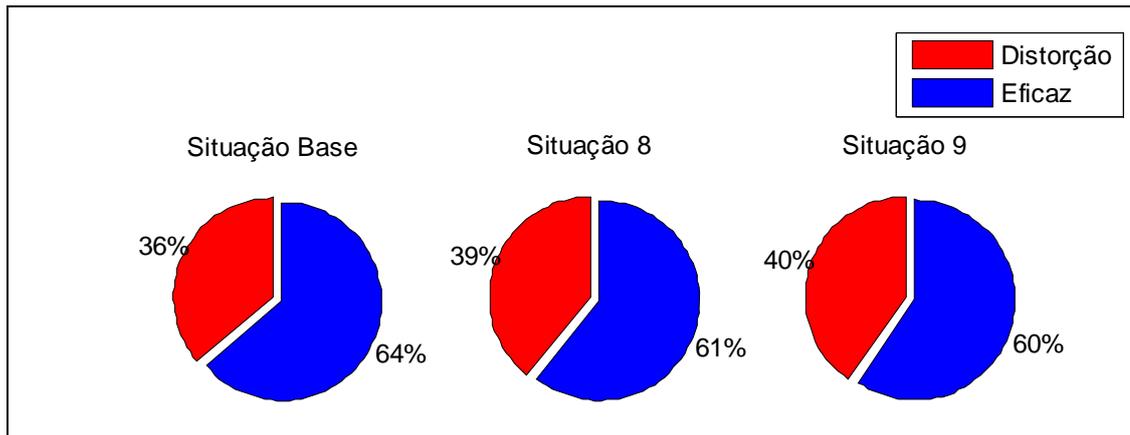


Figura 6.30 – Distribuição do acréscimo de perdas para as situações 1, 8 e 9.

Observa-se que quanto maior a ordem do harmônico alterado menor a influência da diminuição da componente fundamental, uma vez que as alterações são, em magnitude, menores para os harmônicos de maior ordem. Em outras palavras, Por exemplo, quando se analisa a Figura 6.30 nota-se que o impacto, no acréscimo de perdas, do aumento da distorção foi maior do que o impacto do aumento do valor eficaz entre componente fundamental e onda distorcida, tanto quando se compara situação 8 com 9 quanto se compara a situação base com 8 ou 9.

6.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos via medições laboratoriais realizadas para cada conjunto de testes do sistema de medição 2. Também foram realizadas, quando se fazia pertinente, as análises de tais resultados. Outras comparações, bem como comentários, ficam por conta do capítulo de conclusões.

Capítulo 7

Proposta para o Dimensionamento de Transformadores

*“A ciência é, portanto, uma perversão
de si mesma, a menos que tenha como
fim último, melhorar a humanidade.”*

Nikola Tesla

7.1 Considerações Iniciais

Transformadores alimentando cargas não lineares são mais solicitados termicamente devido a dois fatores:

- Aumento da corrente para uma mesma potência ativa de uma carga linear equivalente;
- Aumento adicional das perdas nos enrolamentos devido ao efeito pelicular.

Tal fato requer que o transformador seja sobre dimensionado em termos de potência.

7.2 Proposta para o Sobredimensionamento de Transformadores

Admitindo-se uma carga linear de potência ativa P_{ativa} , a potência nominal do transformador deve ser no mínimo:

$$S_{TN} = \frac{P_{ativa}}{FP} \quad (7.1)$$

Onde FP é o fator de potência.

Vale observar que para a carga linear o fator de potência é basicamente definido pelo atraso da corrente em relação à tensão.

Por outro lado, quando o transformador alimenta uma carga não linear, os dois fatores que levam à solicitação térmica adicional devem ser considerados na definição da potência nominal.

A consideração do primeiro fator, ou seja, do aumento da corrente também se reflete no fator de potência, como ocorre para a carga linear. A diferença fundamental é que o fator de potência para a carga não linear não é definido apenas pelo atraso da corrente em relação à tensão, sofrendo interferência das formas de onda da corrente e da tensão.

Por exemplo, para um conversor de corrente alternada em corrente contínua (caso básico dos experimentos) o fator de potência é dado pela expressão (7.2).

$$FP = f_d \cos \alpha \quad (7.2)$$

Onde $f_d = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2}} = \frac{I_1}{\sqrt{1 + DHT_I^2}}$ é o fator de distorção e α é o ângulo entre as

componentes fundamentais de tensão e corrente.

Comparando com a equação que define a potência para a carga linear, verifica-se que o aumento de corrente está definido pelo fator f_d .

Considerando o efeito pelicular, que também contribui para o sobredimensionamento, nos capítulos 5 e 6 foi estabelecido o fator $A_p = \frac{P_{\text{joule-não-linear}}}{P_{\text{joule-linear}}}$ que relaciona as perdas joule sob condições não lineares com as mesmas sob condições lineares. Tal fator define a solicitação adicional devido ao efeito pelicular.

Como o efeito pelicular ocorre nos enrolamentos, ele está ligado às perdas por efeito joule nos mesmos. Desta forma é conveniente que as perdas no transformador sejam agrupadas em dois tipos básicos e que elas sejam definidas em função da potência do transformador.

Se o transformador de potência nominal S_{TN} alimenta uma carga não linear, as perdas são definidas pela equação (7.3).

$$P = P_{\text{ferro}} + P_{\text{joule}} = aS_{TN} + b \left(\frac{S_T}{S_{TN}} \cdot \frac{1}{f_d} \right)^2 S_{TN} A_p \quad (7.3)$$

Onde S_T é a potência aparente da carga linear equivalente.

Para que as perdas nos enrolamentos sejam mantidas no valor nominal tem-se:

$$bS_{TN} = b \left(\frac{S_T}{S_{TN}} \cdot \frac{1}{f_d} \right)^2 A_p S_{TN}$$

Isolando a potência aparente obtém-se:

$$\frac{S_T}{S_{TN}} = \frac{f_d}{\sqrt{A_p}} = f_d A_p^{-0,5}$$

Em pu, tal expressão pode ser representada da seguinte maneira:

$$S_{Tu} = f_d A_p^{-0,5} \quad (7.4)$$

Observa-se que a expressão (7.4) relaciona diretamente o dimensionamento do transformador sob condição não linear com dois fatores:

- O primeiro (f_d) é responsável por quantificar a redução de potência do transformador perante o aumento da corrente;
- O segundo (A_p), complementarmente, é responsável por quantificar a redução da potência perante o aumento do efeito pelicular devido à distorção da forma de onda da corrente.

Conseqüentemente, de posse de S_{Tu} , a redução na potência aparente nominal (RAPR) do transformador pode ser obtida pela expressão (7.5).

$$RAPR\% = 100(1 - S_{Tu}) = 100(1 - f_d A_p^{-0,5}) \quad (7.5)$$

Complementarmente, pode-se obter o acréscimo de temperatura no caso no qual o mesmo transformador seja submetido à circulação de uma corrente distorcida em comparação com uma corrente senoidal.

A princípio, a equação (7.6) traz a relação entre a temperatura da situação não linear e a da situação linear.

$$\frac{T_{nao-linear}}{T_{linear}} = \frac{aS_{TN} + bA_p \left(\frac{S_T}{S_{TN}} \cdot \frac{1}{f_d} \right)^2 S_{TN}}{aS_{TN} + bS_{TN}} \quad (7.6)$$

Uma vez que se deseja avaliar o acréscimo de temperatura para um mesmo transformador, deve-se admitir igualdade entre S_T e S_{TN} . Dessa forma obtém-se a expressão (7.7).

$$\frac{T_{nao-linear}}{T_{linear}} = \frac{a + b \frac{A_p}{f_d^2}}{a + b} \quad (7.7)$$

Observa-se que, o aumento da temperatura no transformador depende, além do fator de acréscimo de perdas e do fator de distorção, da relação entre perdas no núcleo e perdas no enrolamento. Quanto maior for a segunda em relação à primeira maior o aquecimento sofrido pelo transformador.

Desta forma, é interessante analisar dados de fabricantes. Por exemplo, na Tabela 7.1 são mostrados valores típicos de potência aparente e perdas de transformadores.

Pode-se observar que a relação entre as perdas em vazio e as perdas em curto se altera em função da potência nominal do transformador. Desta maneira, o acréscimo de

temperatura entre a situação linear e a não linear também se altera em função da mesma grandeza.

Tabela 7.1 – Valores típicos de potência aparente e perdas de transformadores.
(Fonte: ABB)

S_T (kVA)	P_0 (kW)	P_k (kW)	S_T (kVA)	P_0 (kW)	P_k (kW)
50	0,35	1,23	630	1,37	6,69
100	0,44	1,76	800	1,80	8,01
160	0,61	2,38	1000	2,00	8,90
250	0,82	3,08	1250	2,50	11,13
315	1,10	3,78	1600	2,80	12,46
400	1,15	4,31	2000	3,60	16,20
500	1,35	5,63	2500	4,30	18,90

De posse da sistemática de obtenção da redução de potência aparente, bem como do acréscimo de temperatura do transformador pode-se aplicar os resultados das medições laboratoriais para se quantificar o dimensionamento do transformador para cada situação de distorção ensaiada.

7.3 Aplicação da Proposta de Dimensionamento nos Resultados das Medições

Uma vez que o desenvolvimento foi realizado, podem-se obter os valores de dimensionamento do transformador sob condições não senoidais, ou seja, os valores de S_{Tu} e $RAPR\%$ para os dois conjuntos de testes do sistema 2.

i. Sistema 2: Conjunto de Testes 1

De posse do aumento das perdas devido ao efeito pelicular $A_p = 1,0828$ e do fator de distorção $f_d = 0,9578$ pode-se calcular a máxima potência aparente:

$$S_{Tu} = 0,9578 \cdot 1,0828^{-0,5} = 0,9578 \cdot 0,9610 = 0,9205$$

E, conseqüentemente é possível obter a redução de potência aparente:

$$RAPR\% = 100(1 - 0,9205) = 7,95\%$$

Observa-se que a potência aparente que o transformador é capaz de suprir para tal situação de distorção é 7,95 % menor do que a potência que o mesmo transformador é capaz de suprir trabalhando sob condições senoidais.

Pode-se obter também o aumento da temperatura quando da circulação da corrente distorcida em relação à senoidal. Para tanto se admite, de acordo com o menor transformador da Tabela 7.1, que $a = 1$ e $b = 3,51$.

$$\frac{T_{nao-linear}}{T_{linear}} = \frac{1 + 3,51 \cdot \frac{1,0828}{0,9578^2}}{1 + 3,51} = 1,1403$$

Nota-se que a temperatura aumenta cerca de 14 % ao passo que as perdas por efeito joule nos enrolamentos aumentam cerca de 18 %. Esses números reforçam a idéia de que a preocupação com o aumento da temperatura deve ser tão maior quanto maior forem as perdas nos enrolamentos em relação às perdas no núcleo.

ii. Sistema 2: Conjunto de Testes 2

A mesma sistemática pode ser aplicada para o conjunto de testes 2. No entanto, como este é composto por nove situações, os resultados são mostrados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Dimensionamento do transformador para as nove situações ensaiadas.

Situações	$A_p^{-0,5}$	f_d	S_{Tu}	RAPR%	$\frac{T_{nao-linear}}{T_{linear}}$
1	0,9784	0,9642	0,9434	5,66 %	9,64 %
2	0,9626	0,9422	0,9070	9,30 %	16,77 %
3	0,9583	0,9140	0,8759	12,41 %	23,62 %
4	0,9652	0,9521	0,9190	8,10 %	14,32 %
5	0,9609	0,9349	0,8983	10,17 %	18,63 %
6	0,9734	0,9611	0,9355	6,45 %	11,10 %
7	0,9709	0,9568	0,9290	7,10 %	12,35 %
8	0,9724	0,9610	0,9344	6,56 %	11,31 %
9	0,9669	0,9553	0,9236	7,64 %	13,41 %

Observa-se que a relação entre $A_p^{-0,5}$ e f_d é praticamente idêntica à distribuição do acréscimo de perdas mostradas no item 6.3.4. Em números, analisando a situação 1, observa-se que 37,63 % da redução de potência são causados pela distorção da forma de onda, enquanto que, de acordo com a Figura 6.27, 36 % da redução são atribuídos à mesma causa.

Nota-se também que o impacto do aumento da temperatura é maior do que o da redução da potência aparente do transformador, fato que defende o argumento de que é necessário analisar também a distribuição de perdas no transformador para se obter um dimensionamento mais exato. Em outras palavras, analisando a situação 3, a máxima potência aparente admissível para que as perdas se mantenham é de 87,59 %, ao passo que, considerando que as perdas nos enrolamentos são 3,51 vezes maiores que as perdas no núcleo, a temperatura aumenta 23,62 %.

7.4 Comparativo entre as Propostas de Dimensionamento Teórico e Prático

De acordo com o procedimento de cálculo teórico descrito no capítulo 2 e com os resultados obtidos no item 7.3 é possível realizar uma análise comparativa entre ambas as maneiras de dimensionamento de transformadores.

Para tanto, a comparação para o conjunto de testes 1 é realizada na Tabela 7.3, já a Tabela 7.4 mostra os resultados para o conjunto de testes 2.

Tabela 7.3 – Comparativo para o conjunto de testes 1.

Dimensionamento Teórico		Dimensionamento Prático	
$I_{\max u}$	RAPR%	S_{Tu}	RAPR%
0,8851	10,97 %	0,9205	7,95 %

Tabela 7.4 – Comparativo para o conjunto de testes 2.

Situações	Dimensionamento Teórico		Dimensionamento Prático	
	$I_{\max u}$	RAPR%	S_{Tu}	RAPR%
1	0,8525	14,25 %	0,9434	5,66 %
2	0,8256	16,96 %	0,9070	9,30 %
3	0,7938	20,15 %	0,8759	12,41 %
4	0,8206	17,46 %	0,9190	8,10 %
5	0,7805	21,49 %	0,8983	10,17 %
6	0,8286	16,65 %	0,9355	6,45 %
7	0,7996	19,57%	0,9290	7,10 %
8	0,8155	17,97 %	0,9344	6,56 %
9	0,7699	22,56 %	0,9236	7,64 %

Observa-se que, para o conjunto de testes 1 os resultados, teórico e prático, se aproximaram mais do que quando se analisa qualquer uma das situações do conjunto de testes 2. Tal comportamento se deve à diferença da distorção de corrente entre os dois conjuntos. Em outras palavras, dependendo da composição harmônica da corrente que circula pelos enrolamentos do transformador a metodologia de dimensionamento sugerida neste capítulo se aproxima mais ou menos do procedimento teórico destinado ao mesmo fim.

Quando se analisa as situações do conjunto de testes 2 entre si, nota-se que há uma grande sensibilidade da diferença entre os procedimentos de dimensionamento em relação à distorção de corrente aplicada. Em outras palavras, quando se dobra o 5º harmônico a diferença entre as formas de dimensionamento é de 7,74 %, ao passo que quando se dobra o 13º harmônico a diferença passa a ser de 14,92 %.

Tal diferença pode ser observada também quando da comparação entre o produto dos fatores f_d e $A_p^{-0,5}$ com o fator K ou o fator F_{HL} (vide capítulo 2). A influência do fator de f_d na obtenção da redução de potência via metodologia prática pode ser comparada à parcela do fator F_{HL} que, no procedimento teórico, considera o aumento de valor eficaz quando se substitui uma corrente senoidal por uma distorcida. Sendo assim, a diferença entre a redução de potência obtida via cálculo prático e teórico pode ser atribuída à parcela correspondente ao acréscimo de perdas devido ao aumento do efeito pelicular. Para calcular tal influência o fator F_{HL} multiplica cada quadrado harmônico pelo quadrado de sua ordem. Em valores numéricos um harmônico de ordem 1 (fundamental) de magnitude 100 causa o mesmo acréscimo de perdas do que um harmônico de ordem 13 de magnitude 7,69.

Desta maneira, o fator F_{HL} , a exemplo do fator K, atribui o acréscimo de perdas por aumento do efeito pelicular à relação entre magnitude da componente harmônica com o quadrado da frequência da mesma. Por outro lado a proposta de dimensionamento considera a distorção da forma de onda de corrente da maneira como ela é, sem a necessidade de se dividir tal corrente em parcelas de senóides de diversas frequências múltiplas de 60 Hz.

Assim sendo, em comparação com o resultado prático, o resultado teórico, obtido via fator F_{HL} superestima a influência da frequência no acréscimo das perdas do transformador.

Vale observar que tal conclusão é possível de ser extraída apenas para o sistema ensaiado. Resultados diferentes seriam obtidos se ocorressem mudanças no sistema ou nas condições operativas do mesmo. Entre tais mudanças pode-se destacar: potência nominal do transformador; tipo do material do enrolamento, mudança que implicaria em valores de

permeabilidade e condutividade; secção transversal do enrolamento do transformador. Estes, entre outros parâmetros, podem influenciar diretamente no cálculo da redução de potência aparente do transformador, uma vez que a obtenção do fator A_p através da medição de temperatura está diretamente ligada a tais parâmetros. Por outro lado, para o procedimento de cálculo teórico para a redução de potência aparente através do fator F_{HL} tais parâmetros são desconsiderados.

7.5 Obtenção Analítica da Influência do Efeito Pelicular no Aquecimento do Transformador

Nos itens anteriores foi mostrado que é possível obter um dimensionamento alternativo de transformadores destinados à alimentação de cargas não lineares através do fator A_p . Tal fator é obtido através de medição de temperatura e do conseqüente registro das curvas de aquecimento.

Sabe-se que existe uma grande dificuldade de obtenção dessas curvas de aquecimento antes da fabricação dos transformadores, ainda em fase de projeto.

Dessa forma é interessante obter uma maneira de se quantificar a influência do efeito pelicular no aquecimento do transformador analiticamente, ou seja, uma maneira de se obter o fator A_p (ou algum correlato) com base em dados estruturais do transformador e em um banco de dados de ensaios.

Considerando essa linha de raciocínio e com base nos trabalhos, cujas análises pertinentes foram apresentadas no capítulo 2, pode-se estimar que o fator A_p possa ser obtido em função de quatro grandezas, como detalhado na expressão (7.8).

$$A_p = f(D, S_{TN}, \mu, \sigma) \quad (7.8)$$

Onde:

D - Fator obtido através da análise do banco de dados de ensaios;

S_{TN} - Potência nominal do transformador;

μ - permeabilidade magnética;

σ - condutividade elétrica.

De acordo com as análises realizadas neste trabalho, é possível estimar que a magnitude do fator D seja diretamente dependente da distorção da forma de onda da corrente, bem como do impacto que a mesma causa no transformador.

Para compor tal banco de dados deveria ser realizada uma grande gama de ensaios de medição de temperatura em transformadores submetidos a condições não senoidais de operação, esgotando-se ao máximo a variação de dois parâmetros principais:

- Potência nominal do transformador;
- Distorção de forma de onda de corrente.

Para aprimorar mais ainda a qualidade do banco de dados de ensaios, poderia ser acrescida a variação de outro fator de influência: o tipo de material do enrolamento. Dessa maneira seria factível, inclusive, sugerir a melhor relação custo-benefício entre o material a ser utilizado e potência nominal do transformador.

7.6 Considerações Finais

Nesse capítulo foi apresentada uma sugestão para o dimensionamento de transformadores destinados à alimentação de cargas não lineares. Tal proposta leva em consideração o aquecimento provocado por correntes de diversas composições harmônicas em comparação com uma corrente senoidal de 60 Hz. Comentários adicionais, bem como conclusões a respeito desse comportamento serão abordados no capítulo 8.

Capítulo 8

Conclusões

“Não há nada como regressar a um lugar que está igual para descobrir o quanto a gente mudou.”

Nelson Mandela

8.1 Considerações Iniciais

Os resultados obtidos a partir do desenvolvimento deste trabalho corresponderam, em grande parte, aos esperados, idealizados ao início. Dessa forma, o presente capítulo é dividido, a priori, em dois principais tópicos: um trazendo uma coletânea dos resultados alcançados e outro uma avaliação comparativa dos mesmos com a expectativa inicial do trabalho.

8.2 Resultados Alcançados

Como primeiro resultado deste trabalho, pode-se citar a implementação prática de dois sistemas de medição destinados à aquisição de grandezas elétricas e temperatura, possibilitando, obviamente, a comparação entre ambas. Os sistemas possibilitaram todo o desenvolvimento do trabalho, através da definição das situações a serem medidas.

Paralelamente, de posse das idéias para os sistemas de medição, trabalhou-se com algumas simulações computacionais, com o claro objetivo de se obterem dados suficientes para auxiliar na análise comparativa entre os resultados a serem obtidos em laboratório com os esperados, de acordo com a literatura. Pode-se dizer que este objetivo foi completamente alcançado, uma vez que os resultados das simulações trouxeram um maior aprofundamento teórico acerca do trabalho como um todo.

Maior importância e peso têm os resultados obtidos quando das medições laboratoriais, através das respectivas análises.

A princípio, para o sistema de medição 1, cabe enfatizar, além dos resultados das medições propriamente ditos, quatro principais tópicos:

- Obtenção de uma comparação entre a energia dissipada por uma onda distorcida com o somatório das energias dissipadas por suas principais harmônicas. Em outras palavras, obteve-se um resultado prático, no qual o soma das energias dissipadas por cada harmônica se mostrou aproximadamente 5 % maior do que a energia dissipada pela onda distorcida, resultante da composição das harmônicas através das séries de Fourier. Pode

não parecer uma diferença significativa, no entanto, conforme a escala do sistema é possível que 5 % a mais de material alterem significativamente os custos de um projeto de equipamentos elétricos;

- Foi obtido, também através das curvas de aquecimento, o acréscimo das perdas elétricas em função da frequência da corrente que circula no resistor. Obteve-se, por exemplo, que uma corrente de 5000 Hz implica na dissipação de uma potência aproximadamente 4 % maior do que a para uma corrente de 60 Hz;
- Conseqüentemente, obteve-se o comportamento da resistência em função da frequência, através da curva de aquecimento e da relação tensão/corrente, para ambos os fluidos de refrigeração utilizados. As diferenças obtidas são justificadas pelas dificuldades de manutenção das variáveis de influência no sistema de medição.
- Com a substituição do resistor de níquel-cromo pelo banco de resistores foi possível concluir, através dos resultados das medições, que as perdas devido à mudança do aspecto da forma de onda de senoidal para distorcida representam apenas 13 % do total das perdas. O restante é devido ao aumento do valor eficaz da corrente, quando se compara a magnitude da fundamental com a distorcida. Esse fato ressalta que, dependendo do equipamento elétrico sob análise e da intensidade da distorção na forma de onda da corrente, a preocupação com o aumento das perdas não deve ser principalmente voltada ao aumento da resistência devido ao efeito pelicular.

Complementarmente, a respeito das medições realizadas com o sistema 2, pode-se concluir:

- Quando da comparação das situações de linearidade e não-linearidade para a mesma corrente eficaz, obteve-se uma curva de aquecimento mais acentuada quando da circulação da corrente distorcida. Conseqüentemente as perdas obtidas pela situação de não-linearidade foram aproximadamente 8 % maiores do que as obtidas para a situação de linearidade;
- Através da análise dos resultados do conjunto de testes 2, foi possível notar a sensibilidade do acréscimo das perdas em função da alteração das magnitudes dos harmônicos de corrente. Principalmente, além disso, foi possível notar a

diferença no acréscimo das perdas quando da alteração, em igual porcentagem, de magnitudes de harmônicos de ordem diferentes. Em outras palavras, foi possível observar uma relação de compromisso entre alteração de magnitude e ordem de harmônicos.

Por fim, no capítulo 7 foi abordada a sugestão alternativa para dimensionamento de transformadores destinados à alimentação de cargas não lineares. Foi desenvolvida uma metodologia de cálculo da redução de potência aparente do transformador a partir do registro de curvas de aquecimento do mesmo, quando submetido a situações de carregamento linear e não linear. Tal metodologia foi aplicada nos ensaios dos dois conjuntos de testes realizados. O dimensionamento obtido via metodologia sugerida foi comparado com o calculado através do procedimento convencional e os resultados revelaram certa discrepância, de magnitude dependente da distorção da forma de onda da corrente. Em outras palavras, dependendo da forma de onda de corrente a metodologia convencional conduz a um nível diferente de sobredimensionamento em relação à metodologia sugerida.

Também se obteve o aumento da temperatura do transformador quando da alimentação de cargas não lineares. Tal aumento se manteve em patamares menores do que o acréscimo de perdas, haja vista que somente se aumentam as perdas joule. Desta maneira, é importante questionar se realmente a melhor solução para a alimentação de tais cargas é o aumento da potência nominal do transformador. Questiona-se com base em dois argumentos, o primeiro a ser considerado para sistemas operantes e o segundo a ser avaliado em fase de projeto:

- Transformadores são fabricados para uma potência nominal de funcionamento a uma determinada temperatura ambiente. Se tal temperatura for diminuída, os transformadores são naturalmente capazes de admitir uma sobrecarga. Desta forma, dependendo das especificações dos equipamentos, seria possível obter uma sobrecarga suficiente para a alimentação de cargas não lineares através da instalação de sistemas de ventilação forçada no transformador ou até mesmo através da instalação de aparelhos de ar condicionado no ambiente de operação do mesmo;
- Os enrolamentos dos transformadores são projetados para suportar determinadas elevações de temperatura. Existem cinco classes de isolamento térmico, a saber: A - 105°C; E - 120°C; B - 130°C; F - 155°C; H - 180°C.

Dessa maneira, também dependendo das características dos equipamentos, pode-se projetar um transformador para uma classe de isolamento térmico maior, de tal forma a compensar o aumento da temperatura, sem que haja a necessidade do aumento da potência nominal do transformador.

8.3 Comparação com a Expectativa

Nesta seção pode-se responder a alguns dos questionamentos realizados no decorrer do trabalho.

A princípio, a igualdade, obtida via simulação, entre as formas de cálculo de energia dissipada não foi mantida quando da obtenção via medições laboratoriais, no entanto tal desigualdade se manteve, em grande parte dos testes, em baixos patamares.

Utilizando o mesmo valor eficaz para as correntes, a energia dissipada na prática é sim maior para a situação não linear frente à linear. Quantitativamente, para o sistema de medição analisado, tal diferença foi de aproximadamente 8 %.

A variação da resistência quando da aplicação, isoladamente, de correntes de variadas frequências ocorre de maneira diferente do que quando da aplicação de correntes distorcidas. Com base nos resultados colhidos em laboratório, para os específicos sistemas de medição montados, esta diferença representa um acréscimo de aproximadamente 5 % na energia dissipada pelo somatório das contribuições de cada harmônica frente à dissipada pela onda distorcida como um todo.

A maior expectativa é a comparação do dimensionamento de transformadores realizados através dos cálculos convencionais com o realizado através da metodologia proposta. A partir dos resultados, observou-se, que para todas as situações ensaiadas, o cálculo convencional conduz ao dimensionamento de um transformador de maior potência quando comparado ao cálculo através da metodologia proposta. Em outras palavras, para todas as situações ensaiadas, o cálculo convencional sobredimensiona o transformador em relação ao cálculo realizado através da medição de temperatura.

Essa conclusão pode ser atribuída apenas para o específico sistema de medição montado e apenas para as condições de distorções de forma de onda ensaiadas. Dessa maneira, quaisquer alterações nesses parâmetros podem influenciar nos resultados. Entretanto, as diferenças registradas entre o dimensionamento convencional e o proposto

reforçam o argumento de que o dimensionamento de transformadores deve ser mais bem explorado em termos de aquecimento dos mesmos.

8.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

A lista de idéias para o posterior desenvolvimento de trabalhos é muito extensa, de tal maneira que se faz interessante, aqui, comentar apenas algumas, cujas importâncias foram julgadas maiores:

- Medição mais precisa de temperatura: para o aprimoramento do sistema de medição, sugere-se a utilização de melhores sensores destinados à medição da temperatura, uma vez que, às vezes, variações mínimas de temperatura podem implicar em resultados significantes;
- Variações dos materiais de resistências: é de grande interesse que a metodologia seja aplicada em outros tipos de materiais, haja vista que uma condição básica de projeto de equipamentos elétricos é a escolha do material;
- Aplicação da metodologia de testes em cabos: objetivando o isolamento das contribuições resistivas e reativas dos mesmos;
- Controle dos sinais de tensão e corrente aplicados ao transformador: desenvolvimento de um sistema de medição capaz de fornecer sinais controlados ao conjunto transformador e carga. Pode-se pensar, por exemplo, em uma mescla dos sistemas de medição 1 e 2, apresentados nesse trabalho;
- Implementação computacional de rotinas capazes de simular circuitos levando em conta o efeito pelicular: características do material, dimensões, etc.
- Desenvolvimento de algoritmos computacionais para auxílio no projeto de equipamentos elétricos: algoritmos estes que devem basear seus cálculos no aquecimento adicional dos equipamentos elétricos.
- Aplicação da metodologia de testes em sistemas de larga escala, uma vez que se sabe que quantos maiores os equipamentos elétricos mais sensibilizados são os mesmos frente ao efeito pelicular;

- Montagem do banco de dados de ensaios de aquecimento de transformadores e obtenção analítica da influência da distorção da forma de onda no acréscimo de perdas dos mesmos, conforme sugerido no item 7.5;
- Consideração na especificação do transformador do regime de operação da carga para o qual é projetado, uma vez que tais tipos de cargas geralmente não operam em regime contínuo.

Referências Bibliográficas

“Aprendi que um homem só tem o direito de olhar outro de cima para baixo para ajudá-lo a levantar-se.”

Gabriel García Márquez

ANDERS, G. J.; BRAKELMANN, H. , “Improvement in Cable Rating Calculations by Consideration of Dependence of Losses on Temperature”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004.

ARNOLD, H. M., “The alternating-current resistance of hollow, square conductors”, J. Inst. Elect. Eng., Vol. 82, pp. 537–545, 1938.

BERLEZE, S. L. M.; ROBERT, R., “Skin and Proximity Effects in Nonmagnetic Conductors”, IEEE Transactions on Education, Vol. 46, No. 3, August 2003.

DELAIBA, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; VILAÇA, A. L. A.; CARDOSO, J. R.. “The Effect of Harmonics on Power Transformers Loss of Life”. 1996.

GALVÃO, F. J. M., PARENTONI, M. F. C.; “Impacto Causado Pelo Uso de Cargas Não Lineares Em Transformadores”. Anais dos Trabalhos de Diploma, Universidade Federal de Itajubá. Dezembro/2004.

GATOUS, O. M. O. ; FILHO, J. P. , “A New Formulation for Skin-effect Resistance and Internal Inductance Frequency-Dependent of a Solid Cylindrical Conductor”, IEEE/PES 2004 Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 919-924.

IEEE Std C57.110-1998. “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”. 1999.

IMRE, T.G.; CRONJE, W.A.; VAN WYK, J.D.; FERREIRA, J.A. “Experimental Validation of Loss Calculations for a Planar Inductor”, Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99.

KIM, S. ; NEIKIRK, D. P. , “Compact equivalent circuit models for the skin effect”, in IEEE MTT-S Symp. Dig., 1996, p. 1815.

KNOWLTON, A. E.; SHOOP, R. M., Manual “Standard” del Ingeniero Electricista, Editorial Labor, S. A., 1967.

MAKSIEJEWSKI, J. L., “Evaluation of thermal characteristics of conductors under surge currents taking the skin effect into account”, IEEE Proceedings, Vol. 137, Pt. A, No. 2, March 1990.

MELIOPOULOS, A. P. S., "Calculation of Secondary Cable Losses and Ampacity in the Presence of Harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992.

MINGLI, W.; YU, F., "Numerical Calculations of Internal Impedance of Solid and Tubular Cylindrical under Large Parameters", IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, January 2004.

O'DELL, T.H., "Skin effect for transient currents", Electronics Letters , Vol.32, No.25, pp.2330-2331, 5 Dec 1996.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G.. "Transformadores - Teoria e Ensaio". 1984.

PACHECO, C. R.; OLIVEIRA, J. C.; SOUTO, O. C. N., "Insulated Cable Thermal And Life Expectancy Estimation Under Non-Sinusoidal Operating Conditions", Paper accepted for presentation at the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000, City University, London, 4-7 April 2000.

PIRELLI, Nota de Cálculo de Resistências, Reatâncias Capacitivas e Indutivas para Cabos de Energia.

ZUNEC, M.; TICAR, I.; JAKL, F., "Determination of Current and Temperature Distribution in Overhead Conductors by Using Electromagnetic-Field Analysis Tools", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July 2006.