



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

JALBERTH FERNANDES DE ARAÚJO

MODELAGEM MATEMÁTICA DE TRANSFORMADORES
MONOFÁSICOS DE BAIXA POTÊNCIA BASEADA NA
RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO

Campina Grande, Paraíba.
Julho de 2013

JALBERTH FERNANDES DE ARAÚJO

MODELAGEM MATEMÁTICA DE TRANSFORMADORES
MONOFÁSICOS DE BAIXA POTÊNCIA BASEADA NA
RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO

*Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande em cumprimento às exigências
necessárias para obtenção do grau de Mestre em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientadores:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.
Julho de 2013



A663m

Araújo, Jalberth Fernandes de.

Modelagem matemática de transformadores monofásicos de baixa potência baseada na resposta em frequência da corrente de excitação / Jalberth Fernandes de Araújo. - Campina Grande, 2013.

62 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

1. Transformadores. 2. Modelagem Matemática. 3. Resposta em Frequência. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Costa, Edson Guedes da. II. Ferreira, Tarso Vilela. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.314(043)

"MODELAGEM MATEMÁTICA DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE BAIXA POTÊNCIA NA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO"

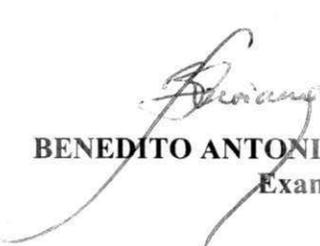
JALBERTH FERNANDES DE ARAÚJO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11/07/2013


TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


EDGAR ROOSEVELT BRAGA FILHO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pela minha existência, por ter me dado serenidade e coragem para vencer sempre.

À minha família e noiva, por se fazerem presentes em todos os momentos da minha trajetória, acreditando que eu seria capaz, apoiando-me nas dificuldades, bem como torcendo e vibrando com cada obstáculo superado. Agradeço por ter aberto mão de seus projetos em favor dos meus.

Tenho uma felicidade imensa de agradecer aos meus orientadores, Professor Tarso Vilela Ferreira e Professor Edson Guedes da Costa, por acreditarem no meu potencial.

Agradeço ao Professor Benedito Antonio Luciano por ter fornecido os transformadores que foram utilizados neste trabalho. Além disso, por todos os ensinamentos tanto profissionais quanto pessoais que me passou durante o curso de graduação até os dias de hoje, pois foram cruciais na minha formação.

Agradeço à Indústria e Comércio de Transformadores COSMO Ltda (Araras-SP), pela doação do transformador de 1 kVA com núcleo de ferro-silício.

Agradeço ao professor Naidu pelo fornecimento da fonte de alimentação de frequência programável utilizada neste trabalho.

Agradeço a todos os professores do curso que forneceram o conhecimento para minha formação como engenheiro.

Agradeço ao colega Marcus Tullius por ter ajudado nas medições e montagens necessárias ao desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a todo pessoal do Laboratório de Alta Tensão na montagem dos equipamentos e auxílio nas questões burocráticas. Em especial a Valdemir, Pablo, Professor George Lira, Professor Genoilton, Eduardo, Adriano e Francisco.

Por fim aos colegas que tanto partilharam minhas desesperanças como também alegrias ao longo da dissertação: Camila, Adriano, Thales, José do Patrocínio, Ericson, entre outros amigos e colegas.

RESUMO

A modelagem matemática permite realizar estudos referentes ao projeto de transformadores para operação em diferentes frequências, à qualidade da energia elétrica do equipamento, ao monitoramento e diagnóstico das condições operativas e à simulação e predição das características comportamentais do equipamento. Desta forma, neste trabalho é apresentada uma modelagem matemática de transformadores monofásicos de baixa potência baseada na resposta em frequência da corrente de excitação. O ensaio de circuito aberto foi realizado para diferentes frequências de excitação e determinou-se a resposta em frequência da corrente de excitação, das amplitudes das componentes harmônicas da corrente de excitação e das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação. Além disso, determinou-se a resposta em frequência dos parâmetros do núcleo dos transformadores ensaiados. Com as respostas em frequência da corrente de excitação e dos parâmetros do núcleo dos transformadores, verificou-se que funções do tipo soma de exponenciais representam satisfatoriamente a corrente de excitação e os parâmetros do núcleo como função da frequência. Ademais, os resultados contribuem com o aprimoramento dos modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes em transformadores monofásicos de baixa potência.

ABSTRACT

The mathematical modeling allows performing studies related to the transformers design to operate in different frequencies, to the power quality of equipment, to the monitoring and diagnosis of operative conditions and to the simulation and prediction of the equipment behavior characteristics. Thus, in this document is present a mathematical modeling of single phase transformers based on excitation current frequency response. The open circuit test was performed for different frequencies and the frequency response of excitation current, magnitudes of harmonic components and phase difference between the voltage and excitation current fundamentals were determined. Furthermore, the magnetizing parameters frequency response was determined. With the excitation current and magnetizing parameters frequency response, it was verified that exponential sum functions represent with a good accuracy the excitation current and magnetizing parameters. Moreover, the results contribute to the improving of mathematical model and circuit equivalent model in single phase transformers.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	3
Resumo.....	4
Abstract.....	5
1 Introdução.....	7
1.1 Contribuições da Dissertação.....	10
1.2 Organização do Texto.....	11
1.3 Objetivos.....	11
2 Revisão Bibliográfica.....	13
3 Fundamentação Teórica.....	17
3.1 Circuito Magnético e Elétrico dos Transformadores.....	17
3.2 Ensaio de Circuito Aberto.....	19
3.3 Coeficiente de Determinação.....	20
3.4 Método dos Mínimos Quadrados Recursivo.....	20
3.5 Determinação das Componentes Harmônicas da Corrente de Excitação.....	21
3.6 Modelagem para Determinação dos Parâmetros Série do Transformador.....	22
3.7 Modelagem para Determinação das Expressões Analíticas.....	24
3.8 Modelagem do Transformador por Circuitos Equivalentes para Diferentes Frequências de Excitação.....	24
4 Metodologia.....	27
4.1 Características dos Transformadores Empregados.....	27
4.2 Procedimento Experimental e Computacional.....	29
5 Resultados.....	32
5.1 Análise das Medições.....	32
5.2 Respostas em Frequência das Correntes de Excitação.....	36
5.3 Respostas em Frequência das Componentes Harmônicas da Corrente de excitação.....	38
5.4 Resposta em Frequência das Diferenças de Fase entre Tensão de Alimentação e Corrente de Excitação.....	42
5.5 Modelagem Matemática da Corrente de Excitação como Função da Frequência.....	47
5.6 Modelagem Matemática dos Parâmetros do Núcleo como Função da Frequência.....	48
5.6.1 Modelagem Matemática das Resistências Representativas das Perdas no Núcleo como Função da Frequência.....	49
5.6.2 Modelagem Matemática das Reatâncias de Magnetização como Função da Frequência.....	51
5.7 Considerações sobre os Resultados.....	55
6 Conclusões.....	57
Trabalhos Futuros.....	59
Referências.....	60

1 INTRODUÇÃO

O transformador é um dos equipamentos mais importantes dos sistemas elétricos. Seu princípio de funcionamento baseia-se na indução eletromagnética decorrente do acoplamento entre duas ou mais bobinas através do núcleo fechado, o qual é constituído de material ferromagnético.

A função mais comum do transformador é transferir energia elétrica do circuito de entrada para um circuito de saída, elevando ou diminuindo os valores de tensão e corrente, mantendo a frequência invariável. Como todo equipamento real, o transformador possui perdas, advindas da resistência elétrica dos enrolamentos, da dispersão do fluxo magnético e do processo cíclico de magnetização do núcleo.

Assim, para efeito de análise e levantamento de um modelo do transformador real podem ser empregados métodos de circuitos equivalentes baseados em princípios físicos e modelagem matemática baseada na teoria clássica de circuitos elétricos. Esses métodos podem servir para estudo antecipado do desempenho do transformador (LUCIANO, 1995). Desta forma, a modelagem do transformador, para fins de simulação, fornece benefícios tais como:

- Redução do tempo de projeto;
- Redução do tempo de desenvolvimento;
- Experiência em condições não reproduzíveis experimentalmente;
- Informações mais completas e detalhadas (variáveis como função da temperatura, tempo, frequência, carga e etc);
- Relação custo benefício cada vez maior;
- Ausência de erros de medição, dentre outras.

A modelagem deve representar as características dos materiais empregados e de construção, externado pelas características comportamentais de um equipamento real, bem como, suas limitações. Em caso de transformadores usados, a modelagem deve representar as variações físicas ocorridas ao longo da sua vida. Tais características são valorizadas em diversas situações que podem servir para simulações computacionais, projetos, estudos de transitórios, monitoramento e diagnóstico, análise de perdas e etc.

Uma modelagem eficiente deve possuir exatidão de resultados e funções matemáticas de baixa complexidade. Diante disto, diversas pesquisas abordam o assunto de modelagem de transformadores, para estudos de transitórios eletromagnéticos (FERNANDES JR, 2003), de monitoramento e diagnóstico (JIN *et al.*, 2008), de projeto (BELL e BODGER, 2007), análise de perdas (ROSHEN, 1991), dentre outras.

Durante o projeto e modelagem do equipamento, fatores que afetam seu desempenho são levados em consideração. Dentre esses fatores estão a presença das harmônicas (SAID *et al.*, 2008) e do efeito pelicular (ROBERT, 2000), os quais podem aumentar as perdas no transformador à medida que a frequência aumenta; a excitação senoidal com diferentes graus de distorção, que acarreta mudanças nas componentes harmônicas da corrente de excitação (CHOWDHURY *et al.*, 1999), sendo importante para estudos de qualidade da energia elétrica.

Adicionalmente, a influência da frequência sob o transformador tem sido estudada por diversos pesquisadores permitindo o desenvolvimento de projetos para operação em diferentes frequências e uma caracterização mais precisa do equipamento (SLEMON, 1974; FALCONE, 1979; THOUTTUVELIL *et al.*, 1990). Os estudos relacionados à operação do transformador em diferentes frequências contribuíram para diminuição da massa e volume dos componentes em dispositivos eletroeletrônicos (PETKOV, 1995), além de permitir sua empregabilidade para diversas aplicações, dentre as quais: fontes de potência chaveadas (ASENSI *et al.*, 1994), painéis fotovoltaicos (RODRIGUES *et al.*, 2003) e transformadores de corrente (CATALIOTTI *et al.*, 2008).

Ainda no estudo da influência espectral, a técnica de análise da resposta em frequência é empregada para realizar diagnóstico em transformadores. A técnica é uma das ferramentas mais confiáveis para detecção de deformações nos enrolamentos (ABU-SIADA *et al.*, 2007). Ela pode ser utilizada para modelagem de transformadores por meio da determinação de funções de transferência usadas para simulação e predição de comportamento (ISLAM *et al.*, 1997).

A corrente de excitação também é de suma importância sob aspectos relativos ao projeto (OLIVARES-GALVÁN *et al.*, 2010) e à qualidade da energia elétrica (AL-HAJ *et al.*, 2000). Além disso, a análise do comportamento da corrente de excitação é necessária para estudos do aumento da eficiência do transformador (LUCIANO *et al.*,

2009), assim como para diagnóstico de defeitos no equipamento (RICKLEY *et al.*, 1981).

Conforme visto nos resultados obtidos nas pesquisas mencionadas, fica clara a importância do estudo e modelagem da influência da frequência sob a corrente de excitação em transformadores, pois permite realizar de forma conjunta, estudos relacionados a diversas aplicações, tais como: monitoramento e diagnóstico, modelagem de comportamento, análise da qualidade da energia elétrica, projeto para aplicações na eletroeletrônica, simulação e predição.

Assim, este trabalho foi concebido com o objetivo de contribuir para o aprimoramento dos estudos relacionados ao desenvolvimento de modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes em transformadores monofásicos de baixa potência, por meio da análise da resposta em frequência da corrente de excitação. Os modelos matemáticos propostos são expressões analíticas que modelam a corrente de excitação como função da frequência. A metodologia de concepção dos modelos é baseada em um algoritmo eficiente e de baixo custo computacional.

A motivação e relevância do trabalho estão baseadas nos seguintes aspectos práticos:

- Projeto de transformadores para operação em diferentes frequências, contribuindo com o estudo de redução de volume e massa de componentes para aplicações na eletroeletrônica;
- Análise da qualidade da energia elétrica do equipamento, para determinação das componentes harmônicas da corrente de excitação;
- Monitoramento e diagnóstico das condições operativas do próprio transformador, devido ao uso da análise da resposta em frequência;
- Modelagens matemáticas que possam servir para simulação e predição de comportamento do transformador;
- Aprimoramento dos modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes de transformadores monofásicos de baixa potência, para representar as características comportamentais do equipamento utilizando exatidão de resultados e funções matemáticas de baixa complexidade.

A análise da resposta em frequência da corrente de excitação foi realizada em quatro transformadores monofásicos de baixa potência. As respostas em frequência das correntes de excitação foram determinadas por meio do teste de circuito aberto. O teste é de baixo custo e não há a necessidade de utilização de instrumentos analógicos para a medição.

1.1 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

As principais contribuições deste trabalho de dissertação são as seguintes:

- A apresentação de resultados experimentais que evidenciam o comportamento de transformadores monofásicos de baixa potência submetidos a diferentes frequências de excitação, visto que resultados similares são escassos na literatura;
- A análise dos resultados obtidos permite realizar, de forma conjunta, um estudo antecipado do comportamento dos transformadores monofásicos de baixa potência;
- A utilização do método dos mínimos quadrados recursivo como ferramenta para determinação dos parâmetros série dos transformadores para diferentes frequências de excitação. O método permitiu a obtenção desses parâmetros apenas com a realização do teste de circuito aberto;
- Os estudos realizados neste trabalho contribuem para o aprimoramento dos modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes de transformadores monofásicos de baixa potência;
- Os resultados podem ser utilizados na modelagem para projeto de transformadores para operação em diferentes frequências, uma vez que na modelagem para projeto deve-se evidenciar como diversos fatores (carga, temperatura, frequência e etc.) afetam o comportamento do transformador, e neste trabalho é feito um estudo da influência da frequência sob o comportamento do transformador monofásico de baixa potência.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: na seção 1.3 apresentam-se os objetivos do trabalho. No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica com ênfase em pesquisas recentes que tratam de modelagem, análise da resposta em frequência e fatores que influenciam a corrente de excitação em transformadores. Posteriormente, no capítulo 3 realiza-se o embasamento teórico, seguido da metodologia empregada para desenvolvimento de modelos matemáticos que representam o comportamento da corrente de excitação, dos parâmetros do núcleo e das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação como função da frequência, presente no capítulo 4. Os resultados são apresentados no capítulo 5, seguidos das conclusões e referências bibliográficas.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o aprimoramento dos estudos relacionados ao desenvolvimento de modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes que representem com fidelidade as características do transformador monofásico de baixa potência. Para tanto, foram empregados quatro transformadores monofásicos de baixa potência, sendo três de núcleo de ferro-silício e um quarto de núcleo de liga amorfa.

Para alcançar o objetivo, um algoritmo que utilize os dados oriundos de ensaios experimentais de resposta em frequência da corrente de excitação de transformadores monofásicos de baixa potência foi empregado.

Além disso, foram ainda buscados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência da frequência sob a corrente de excitação de transformadores monofásicos de baixa potência;
- Avaliar o comportamento das componentes harmônicas da corrente de excitação, em função da variação da frequência de excitação;
- Determinar expressões analíticas que modelem as correntes de excitação como função da frequência;

- Determinar os parâmetros do núcleo, mediante o teste de circuito aberto, em diferentes frequências de excitação;
- Determinar expressões analíticas que modelem os parâmetros do núcleo como função da frequência;
- Avaliar as diferenças de fase entre tensão de alimentação e corrente de excitação, como função da frequência, para os transformadores monofásicos de baixa potência empregados neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Técnicas relacionadas à modelagem de transformadores são empregadas em diversas pesquisas e suas aplicações são as mais diversas, tais como: projeto de transformadores para operação em diferentes frequências, qualidade da energia elétrica, aprimoramento de modelagens matemáticas para simulação e predição de características comportamentais, dentre outras.

Keyhani e outros (1986) utilizaram algoritmos de estimação para determinar os parâmetros elétricos do transformador. O objetivo foi determinar os parâmetros elétricos do transformador para simular a resposta do equipamento à adição de cargas não lineares, a fim de estudar seus efeitos antes do equipamento ser adicionado no sistema.

Adicionalmente, pesquisadores também começaram a abordar temas da influência da frequência na modelagem e projeto de transformadores, pois ela afeta as perdas, os parâmetros, os índices de qualidade da energia elétrica do equipamento. Assim, Roshen (1991) desenvolveu um método para calcular as perdas no núcleo de transformadores em altas frequências. Desta forma, as perdas nos circuitos magnéticos são parâmetros de projeto importantes, e em muitos modelos de alta frequência, o magnetismo é limitado por suas perdas.

Analogamente, Petkov (1995) forneceu uma modelagem para projeto de transformadores considerando a influência da frequência. O estudo da influência da frequência sob o transformador é um dos principais contribuintes para a redução do volume e massa de fontes de potência chaveadas. Não obstante, Duffy e outros (1995) e Hurley (1996) realizaram estudos de transformadores para operação em diferentes frequências no tocante às consequências do efeito pelicular e de proximidade. Esses efeitos fazem crescer as perdas nos condutores e modificam os valores de resistência e indutância para cada frequência considerada.

Novas considerações para projeto foram propostas por Hurley e outros (1998), destacando que o transformador pode operar com uma densidade de fluxo máxima abaixo do seu valor de saturação, desde que acima de uma frequência crítica na qual as perdas podem ser minimizadas. O objetivo do trabalho foi estabelecer um método que conduza a otimização do núcleo e do enrolamento para especificações de projeto de transformadores.

A influência da frequência também pode ser utilizada como técnica de diagnóstico para transformadores. Desta forma, Abu-Siada e outros (2007) realizaram estudos utilizando a análise da resposta em frequência para detectar deformações nos enrolamentos. A pesquisa aborda a determinação de funções de transferências que representam o comportamento do transformador, destacando as variações dos parâmetros (resistências, indutâncias e capacitâncias) quando da ocorrência de uma falha. Além disso, essas funções de transferência são utilizadas para simulação de comportamento. Adicionalmente, nesses estudos é abordada a detecção de falhas por meio da localização de pontos de ressonância e comparação de respostas em frequência de amplitude e fase da relação de tensão de saída e entrada.

Outra grandeza de suma importância para caracterização de transformadores é a corrente de excitação. Desta forma, testes na corrente de excitação podem ser usados para localizar os efeitos das faltas nos transformadores, tais como defeitos na estrutura do núcleo magnético ou falhas na isolação. Estes defeitos podem ser reconhecidos por meio do crescimento da corrente de excitação (RICKLEY *et al.*, 1981).

Chowdhury e outros (1999) desenvolveram modelos analíticos para calcular a forma de onda da corrente de excitação sob tensão não puramente senoidal, e também criaram modelos analíticos para determinar as componentes harmônicas da corrente. Nesse trabalho é apresentado que as características das harmônicas da corrente de excitação em transformadores são significativamente diferentes para entradas de tensão não puramente senoidais comparadas com entradas senoidais.

Não obstante, Al-Haj e outros (2000) verificaram que a forma de onda da corrente de excitação é distorcida não somente devido à relação não linear entre densidade de fluxo e campo magnético, mas também por outros fatores, tais como método de empilhamento, material utilizado no núcleo, máximo fluxo permitido e grau de saturação. Os autores concluíram que uma sobre-excitação no transformador resulta em um substancial crescimento do grau de distorção da forma de onda da corrente e que ter uma corrente de excitação baixa não indica que as suas componentes harmônicas também o serão.

Exemplos da redução da corrente de excitação no sentido de contribuir para a eficiência energética dos transformadores foram dados por Luciano e outros (2009). Para tanto, empregaram materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade nos núcleos dos transformadores, apresentando ainda um estudo comparativo de redução de perdas

de um transformador com núcleo de liga amorfa em relação ao transformador de FeSi. Adicionalmente, foram apresentados resultados experimentais sobre os impactos causados pelo processo de oxidação do transformador, na corrente de excitação.

No que diz respeito ao projeto de transformadores, a corrente de excitação é de fundamental importância. Desta forma, Olivares-Galván e outros (2010) investigaram os impactos de diversos parâmetros físicos e construtivos do transformador sob a corrente de excitação. Os parâmetros usados foram: processo de recozimento, processo mecânico, condições de funcionamento, material magnético, processo de montagem e projeto dos parâmetros do núcleo. Os pesquisadores concluíram que a influência desses parâmetros na corrente de excitação não é apenas importante para o estágio de projeto, mas também durante a fase de produção do transformador. Os resultados permitem uma configuração apropriada dos parâmetros de modo a fazer com que a corrente de excitação permaneça dentro dos limites estabelecidos. Os autores propuseram ainda a determinação de expressões analíticas para calcular a corrente de excitação como função dos parâmetros analisados. Conforme os autores, as expressões propostas e não desenvolvidas, seriam úteis para o projeto dos transformadores.

Atualmente, há uma busca por equipamentos que realizem os ensaios em transformadores com rapidez, portabilidade e redução de custos. Batista e outros (2010) desenvolveram um sistema automático para a determinação da corrente de excitação e das perdas em transformadores monofásicos. O sistema foi desenvolvido com o propósito de ser um equipamento de fácil manuseio e de baixo custo, que fornecesse informações relativas à qualidade da energia elétrica fornecida pelo transformador e do estado operacional em que se encontrava o equipamento.

Os parâmetros elétricos do transformador também são alvo de diversas pesquisas, e são importantes para modelagem, projeto, monitoramento e simulação de comportamento. Diversos pesquisadores utilizam diferentes versões derivadas do método dos mínimos quadrados para determinação dos parâmetros elétricos do transformador. Jin e outros (2008) usaram o método dos mínimos quadrados recursivo para monitorar as variações dos parâmetros, fornecendo informações das condições que o transformador estava operando.

Outras pesquisas abordam a determinação dos parâmetros elétricos do transformador como uma função da frequência, que tem impacto direto na qualidade da energia elétrica e no funcionamento do transformador. Hurley e outros (1991)

determinaram um modelo para o cálculo da impedância de curto circuito levando em consideração a dependência da frequência. Os autores consideraram os efeitos pelicular e de proximidade. O método contribui para o projeto de transformadores, no que concerne aos estudos de perdas e ao amplo uso em fontes de potência chaveadas.

Adicionalmente, Meister e Oliveira (2009) realizaram o ensaio de circuito aberto em diferentes frequências de excitação. O objetivo principal do trabalho era fazer um ajuste de curvas de modo a determinar expressões matemáticas que representassem os parâmetros do núcleo como uma função da frequência. Eles mostraram que um polinômio de terceiro grau modela a reatância de magnetização e um polinômio de segundo grau modela a resistência representativa das perdas do núcleo.

Como visto acima, percebe-se a importância dos estudos relacionados à modelagem da influência da frequência sob a corrente de excitação, pois, modelagem, influência da frequência e corrente de excitação são temas que estão ligados ao projeto, ao diagnóstico, à análise de comportamento e à simulação do equipamento.

Desta maneira, visando dar continuidade à linha de pesquisa de alguns dos trabalhos supracitados, este trabalho pretende contribuir com o aprimoramento dos estudos relacionados ao desenvolvimento de modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes que representem de forma simples e fiel o comportamento do transformador.

De forma sumarizada, são apresentadas na Tabela 1 as contribuições das pesquisas supracitadas, com relação ao tema abordado neste trabalho.

Tabela 1. Contribuições das pesquisas.

Pesquisadores	Contribuições		
	1	2	3
SLEMON (1974) e FALCONE (1979)	X	X	
HURLEY et al. (1991 - 1998)	X	X	
ISLAM et al (1997)	X	X	
RICKLEY et al. (1981)			X
CHOWDHURY et al. (1999 - 2010)		X	X
KEYHANY et al. (1986)	X	X	
MEISTER e OLIVEIRA (2009)	X	X	
Esta Dissertação	X	X	X

1. Realizaram estudos referentes à modelagem de transformadores.
2. Utilizaram a análise de resposta em frequência para avaliar o comportamento do transformador.
3. Avaliaram fatores que afetam a corrente de excitação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentada a fundamentação teórica no intuito de facilitar o entendimento do tema desta dissertação. Assim, têm-se abaixo informações a respeito dos circuitos elétrico e magnético dos transformadores, dos ensaios de circuito aberto realizados, do método dos mínimos quadrados recursivo, da modelagem para determinação dos parâmetros série do transformador utilizando o método dos mínimos quadrados recursivo e da modelagem por circuitos equivalentes para diferentes frequências de excitação do transformador.

3.1 CIRCUITO MAGNÉTICO E ELÉTRICO DOS TRANSFORMADORES

Para efeito de análise e estudo do comportamento de transformadores, a modelagem baseada em circuitos magnéticos e elétricos equivalentes pode ser utilizada. Essa modelagem fornece um melhor entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem no equipamento.

Para análise do circuito equivalente magnético, deve-se saber o tipo de geometria do núcleo. A geometria do núcleo dos transformadores utilizados neste trabalho é do tipo núcleo envolvente, na qual os enrolamentos do primário e do secundário são enrolados concentricamente em torno da coluna central, de acordo com a Figura 1.

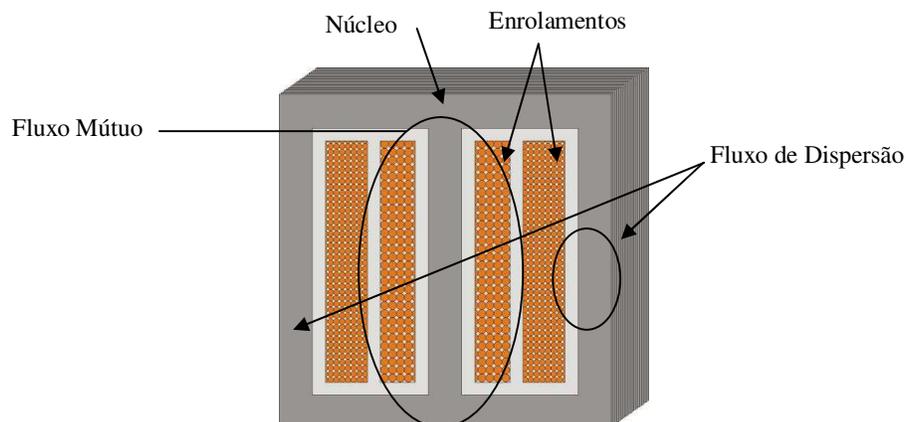


Figura 1. Representação genérica para a geometria do núcleo tipo envolvente.

Com a geometria do núcleo pode-se determinar o circuito magnético equivalente representativo do transformador. Desta forma, observando a Figura 1 é possível identificar: duas fontes de força magnetomotriz relacionadas ao enrolamento de alta e baixa tensão; relutâncias de dispersão, em paralelo a cada uma das forças magnetomotrizes, correspondentes ao fluxo que se dispersa pelo ar; relutâncias de magnetização correspondentes à trave central e às duas laterais. Assim, o circuito magnético equivalente representativo da Figura 1 está apresentado na Figura 2.

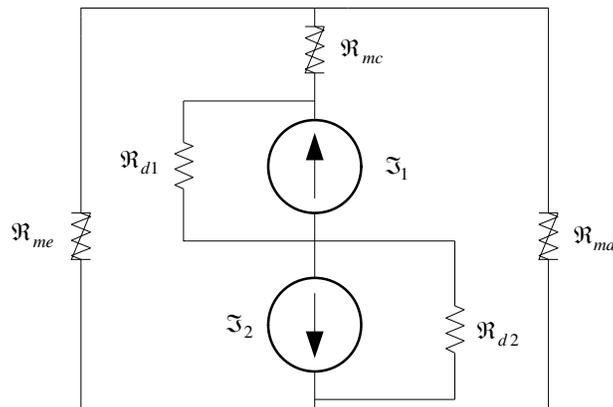


Figura 2. Circuito magnético equivalente dos transformadores (LUCIANO, 2010).

Na Figura 2: \mathfrak{T}_1 e \mathfrak{T}_2 representam as forças magnetomotrizes relacionadas aos enrolamentos de alta e baixa tensão, \mathfrak{R}_{d1} \mathfrak{R}_{d2} são as relutâncias de dispersão, \mathfrak{R}_{mc} , \mathfrak{R}_{me} , \mathfrak{R}_{md} e são as relutâncias correspondentes à coluna central e às traves laterais esquerda e direita, respectivamente.

Com isto, o circuito elétrico equivalente dos transformadores pode ser obtido a partir do circuito magnético equivalente, mediante a aplicação do princípio topológico da dualidade. Esta técnica diz respeito à marcação de um nó para cada malha do circuito magnético. Os nós são então unidos por ramificações, uma das quais passa através de cada elemento do circuito magnético (LUCIANO, 2010).

Assim, para cada relutância numa malha do circuito magnético, há uma indutância conectada ao nó correspondente do circuito elétrico, e para cada força magnetomotriz há uma fonte de tensão e uma resistência correspondentes. Além disso, ao circuito elétrico adiciona-se uma resistência representativa das perdas no núcleo. Desta forma, o circuito elétrico equivalente dos transformadores está apresentado na Figura 3.

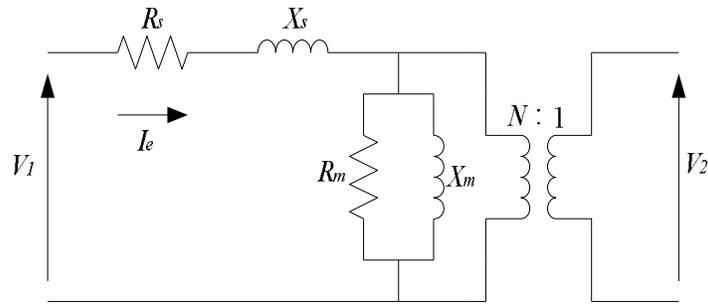


Figura 3. Circuito elétrico equivalente do transformador (SLEMON, 1974).

Na Figura 3: R_s é a resistência equivalente dos enrolamentos referida ao primário, X_s é a reatância equivalente de dispersão referida ao primário, R_m é a resistência representativa das perdas ativas no núcleo, X_m representa a reatância de magnetização, N é a relação de transformação, V_1 e V_2 são as tensões no primário e no secundário, respectivamente e I_e é a corrente de excitação.

Para análise dos fenômenos físicos que ocorrem no equipamento e para modelagem matemática do transformador foi utilizado neste trabalho o circuito elétrico equivalente.

3.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

O ensaio de circuito aberto é realizado para determinação da corrente de excitação, resistência representativa de perdas no núcleo e reatância de magnetização. O ensaio é feito aplicando-se tensão nominal, na frequência industrial, sob o enrolamento de baixa tensão, enquanto o enrolamento de alta tensão fica em aberto. A tensão aplicada deve ser senoidal (ABNT, 1993). Os parâmetros de magnetização foram determinados conforme (1) e (2).

$$R_m = \frac{V_{CA}}{I_e \cdot \cos\theta}, \quad (1)$$

$$X_m = \frac{V_{CA}}{I_e \cdot \sin\theta}, \quad (2)$$

em que, V_{CA} representa a tensão de circuito aberto, I_e é a corrente de excitação, R_m é a resistência representativa das perdas no núcleo, X_m é a reatância de magnetização, θ é o ângulo entre a tensão e corrente.

A tensão nem sempre é senoidal devido à presença das componentes harmônicas, e isso pode provocar erros de medição. Assim, a utilização de uma fonte que forneça uma tensão mais próxima da senoidal é essencial para a obtenção de uma medição mais confiável e de acordo com a norma regulamentadora.

3.3 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

O coeficiente de determinação (R^2) pode ser utilizado para avaliar o quanto funções regressoras ajustam-se a valores de grandezas medidas em experimentos. Desta forma, esse coeficiente indica o quanto um modelo matemático consegue adequar-se aos valores observados de certa variável medida, seja ela corrente, tensão, temperatura, etc.

O R^2 varia entre 0 e 1, e quanto maior for seu valor, melhor o modelo ajusta-se à amostra (CAMERON *et al.*, 1997). A forma de calcular este parâmetro está em (3).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (3)$$

em que, SSE é o somatório da diferença dos quadrados entre o sinal em estudo e o sinal modelo e SST é o somatório da diferença dos quadrados entre o sinal em estudo e a média deste sinal.

O coeficiente de determinação foi utilizado como parâmetro numérico para avaliar as modelagens matemáticas que serão apresentadas como resultados do trabalho.

3.4 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO

O método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MQR) é uma técnica em que são estimados, iterativamente, por mínimos quadrados, os parâmetros desconhecidos. Este método é amplamente utilizado para identificação de sistemas e estimação de parâmetros de modelos (ASTROM e WITTENMARK, 1990).

O MQR proporciona monitoramento da estimação, podendo atingir o valor esperado antes do critério de parada, o que ocasiona redução de esforço computacional.

Em (4), (5) e (6) tem-se o conjunto de expressões matemáticas que podem ser utilizadas para implementação do algoritmo do MQR.

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) + K(k) \cdot [y_{k+1} - \varphi^T(k+1) \cdot \alpha(k)], \quad (4)$$

$$K(k) = P(k) \cdot \varphi(k+1) \cdot [\lambda + \varphi^T(k+1) \cdot P(k) \cdot \varphi(k+1)]^{-1}, \quad (5)$$

$$P(k+1) = \frac{[I - K(k) \cdot \varphi^T(k+1)] \cdot P(k)}{\lambda}, \quad (6)$$

em que, α é o vetor de parâmetros desconhecidos, K é chamada matriz de ganho, P é uma matriz proporcional à matriz de covariância de α , y representa valores medidos do sinal em estudo, I é a matriz identidade, λ é chamado fator de esquecimento e Φ corresponde às funções de aproximação que representam o modelo.

O valor do fator de esquecimento fornece o peso que será dado às observações passadas, e seu valor normalmente varia entre 0,9 e 1. Assim, quando seu valor é 1, significa dizer que 100 % das observações passadas serão consideradas na estimativa, e quando seu valor é 0,9, apenas 90 % das amostras passadas serão consideradas.

Neste trabalho está sendo utilizado um fator de esquecimento igual 1, o qual fornece às propriedades da estimação recursiva clássica, em que a estimativa mais atual é feita baseando-se nas estimativas anteriores.

No entanto, é importante ressaltar que o ajuste do fator de esquecimento favorece a rapidez e exatidão do algoritmo (ASTROM e WITTENMARK, 1990; AGUIRRE, 2004).

3.5 DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO

Resultados validando o uso do MQR, para determinação das componentes harmônicas em diferentes sinais, foram apresentados por ARAÚJO e outros (2012). Os pesquisadores apresentaram um estudo comparativo entre métodos de determinação das componentes harmônicas de diferentes sinais, e mostraram que usando o MQR, consegue-se baixo esforço computacional com um grau de exatidão elevado. Os métodos que foram comparados foram o MQR, FFT, Levenberg-Marquardt e Algoritmo de Goertzel. Os sinais foram modelados conforme a expressão (7), fornecendo R^2 próximos à unidade.

Como a utilização do MQR proporciona baixo esforço computacional com um grau de exatidão elevado, esse método foi escolhido para ser usado na determinação das componentes harmônicas da corrente de excitação.

Assim, a fundamental, terceira e quinta harmônica, dos sinais de corrente de excitação, foram determinadas mediante o emprego do MQR, seguindo o modelo apresentado em (7).

$$s(t) = A_1 \cdot \cos(\omega t + \theta_1) + A_3 \cdot \cos(3\omega t + \theta_3) \quad (7)$$

$$A_5 \cdot \cos(5\omega t + \theta_5),$$

em que s (representativo da corrente de excitação), é uma função de t (tempo), A_n é amplitude da harmônica n e θ_n é a fase da harmônica n , e ω representa a frequência angular.

Comparando a expressão (7) com as expressões matemáticas que podem ser utilizadas para implementação do algoritmo do MQR tem-se que: $s(t)$ é o representativo de y , que são os valores medidos do sinal em estudo; A_n e θ_n correspondem à α , o qual é o vetor de parâmetros desconhecidos e as funções senos e cossenos representam Φ , correspondentes às funções de aproximação que representam o modelo.

3.6 MODELAGEM PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS SÉRIE DO TRANSFORMADOR

Para determinação dos parâmetros série do transformador (R_s e X_s) utilizou-se o método dos MQR, o qual é um método de identificação e estimação. O emprego do método, neste propósito, foi baseado nos trabalhos de Keyhani e outros (1986) e Jin e outros (2008), os quais o empregaram como técnica alternativa para determinar os parâmetros do transformador no ponto em que o equipamento está operando.

Desta forma, aplicando a teoria clássica de circuitos ao ramo sério do circuito elétrico equivalente do transformador apresentado na Figura 3 tem-se a expressão (8).

$$V_1 - NV_2 = R_s \cdot I_e + L_s \cdot \frac{dI_e}{dt}, \quad (8)$$

em que V_1 e V_2 são as tensões no primário e no secundário, respectivamente; N é a relação de transformação, R_s é a resistência dos enrolamentos; I_e é a corrente de excitação e L_s é a indutância de dispersão.

Na expressão (8) não há a consideração que os parâmetros do ramo série do transformador variam com a frequência. Assim, isso pode ser verificado na expressão (9).

$$V_1^\omega - NV_2^\omega = R_s^\omega \cdot I_e^\omega + L_s^\omega \cdot \frac{dI_e^\omega}{dt}, \quad (9)$$

em que as grandezas tensão e corrente, resistência e indutância são consideradas para cada frequência de excitação do transformador.

É importante verificar que, para o processo de estimação, a expressão (9) fica de acordo como está a expressão (10).

$$\begin{bmatrix} V_1^\omega(\Delta t_1) - NV_2^\omega(\Delta t_1) \\ V_1^\omega(\Delta t_2) - NV_2^\omega(\Delta t_2) \\ \vdots \\ V_1^\omega(\Delta t_{2500}) - NV_2^\omega(\Delta t_{2500}) \end{bmatrix} = R_s^\omega \cdot \begin{bmatrix} I_e^\omega(\Delta t_1) \\ I_e^\omega(\Delta t_2) \\ \vdots \\ I_e^\omega(\Delta t_{2500}) \end{bmatrix} + L_s^\omega \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_e^\omega}{dt}(\Delta t_1) \\ \frac{dI_e^\omega}{dt}(\Delta t_2) \\ \vdots \\ \frac{dI_e^\omega}{dt}(\Delta t_{2500}) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

em que Δt corresponde ao tempo entre cada amostra no processo de medição, e 2500 é o número de amostras consideradas nesta dissertação.

Assim, aplicando-se o MQR na expressão (10) tem-se que: R_s e L_s são os parâmetros desconhecidos, a matriz $V_1^\omega - NV_2^\omega$ corresponde ao sinal medido; e I_e^ω e $\frac{dI_e^\omega}{dt}$ formarão a matriz representativa das funções de aproximação.

Para determinação da reatância de dispersão usa-se a expressão (11).

$$X_s^\omega = \omega \cdot L_s^\omega, \quad (11)$$

em que, X_s^ω é a reatância de dispersão para cada frequência de excitação que o transformador está submetido.

3.7 MODELAGEM PARA DETERMINAÇÃO DAS EXPRESSÕES ANALÍTICAS

A determinação das expressões analíticas que representam a corrente de excitação e os parâmetros do núcleo como função da frequência também podem ser determinadas pelo MQR. Para tanto, basta determinar as funções de aproximação que serão utilizadas para modelar a corrente e os parâmetros do núcleo como função da frequência. Neste caso, foram utilizadas funções polinomiais, assim como proposto por Meister e Oliveira (2009), e funções do tipo soma de exponenciais, de modo que sejam feitas comparações entre esses dois tipos de funções.

Para avaliar o grau de adequação das expressões analíticas aos valores observados utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2).

Assim, as funções consideradas estão em (12), (13) e (14).

$$Y(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d, \quad (12)$$

$$Y(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c, \quad (13)$$

$$Y(x) = a \cdot e^{b \cdot x} + c \cdot e^{d \cdot x}, \quad (14)$$

em que Y é uma função de x e a , b , c , e d são os parâmetros desconhecidos, os quais podem ser estimados usando o MQR.

3.8 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR POR CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE EXCITAÇÃO

Para caracterizar um transformador em uma ampla faixa de frequências é necessário escrever as equações representativas com os parâmetros de circuito como uma função da frequência. Caso seja conhecido o comportamento dos parâmetros do

circuito equivalente em função da frequência, vários circuitos simplificados podem ser modelados, cada qual sendo razoavelmente válido para certo trecho de faixa de frequência. (SLEMON, 1974; FALCONE, 1979).

As modelagens de circuitos equivalentes para o transformador, referentes a diferentes frequências de excitação, estão apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6.

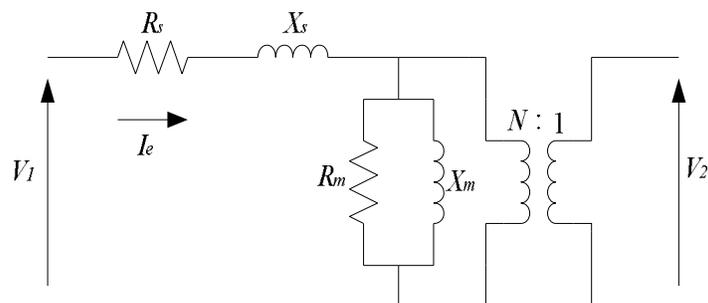


Figura 4. Modelagem de circuito equivalente do transformador para baixas frequências (SLEMON, 1974).

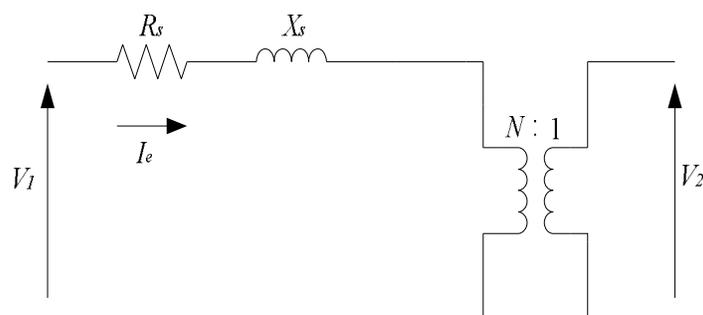


Figura 5. Modelagem de circuito equivalente do transformador para médias frequências (SLEMON, 1974).

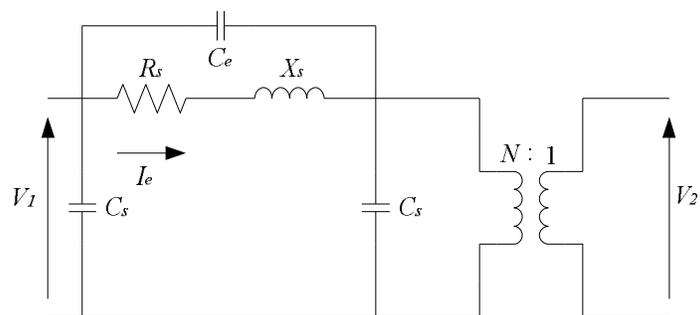


Figura 6. Modelagem de circuito equivalente do transformador para altas frequências (SLEMON, 1974).

Nas Figuras 4, 5 e 6: R_s é a resistência equivalente dos enrolamentos referida ao primário, X_s é a reatância equivalente de dispersão referida ao primário, R_m é a

resistência representativa das perdas ativas no núcleo, X_m representa a reatância de magnetização, N é a relação de transformação, V_1 e V_2 são as tensões no primário e no secundário, respectivamente, I_e é a corrente de excitação, C_s representa as capacitâncias entre os enrolamentos e a terra e C_e representa as capacitâncias entre os enrolamentos.

Diante disto, em baixas frequências (50 a 200 Hz) o efeito não linear do ramo de magnetização dos transformadores é mais significativo. Em médias frequências (200 a 1500 Hz), os impactos causados por esse ramo na corrente de excitação são menores. Em frequências mais elevadas (1500 Hz em diante), os efeitos das capacitâncias devem ser levados em consideração (FALCONE, 1979).

Os modelos de circuitos equivalentes propostos nas Figuras 4, 5 e 6 são topologias clássicas publicadas originalmente há mais de 30 anos. Apesar de existirem outros modelos propostos mais recentes e de maior complexidade, os modelos clássicos supracitados foram suficientes para auxiliar na representação de comportamento dos transformadores monofásicos de baixa potência que foram usados neste trabalho.

4 METODOLOGIA

Como procedimento inicial da metodologia adotada, foi realizada uma revisão bibliográfica aprofundada referente ao tema pesquisado, mediante livros, artigos científicos, dissertações, teses e normas regulamentadoras, conforme destacado no Capítulo 2. Além disso, é exposto nas seções subsequentes as características dos transformadores empregados, assim como o procedimento experimental e computacional adotados para determinação dos modelos matemáticos que representam a corrente de excitação e os parâmetros do núcleo como função da frequência.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES EMPREGADOS

A fim de que os objetivos fossem alcançados, foram empregados quatro transformadores monofásicos de baixa potência, conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos transformadores que foram empregados.

Características	Transformadores			
	LA1k	FS1k	FS100	FS60
Potência (VA)	1000	1000	100	60
Relação de Transformação	220/110	220/110	220/110	127/12
Material do Núcleo	Liga Amorfa (Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉)	FeSi	FeSi	FeSi
Corrente nominal do primário (A)	4,540	4,540	0,450	0,470
Corrente nominal do secundário (A)	9,090	9,090	0,900	5,000
Bitola do primário (mm²)	1,300	1,300	0,129	0,410
Bitola do secundário (mm²)	2,600	2,600	0,259	1,650
Comprimento do núcleo (cm)	12,800	20,400	8,000	9,500
Largura do núcleo (cm)	10,160	8,000	5,100	5,000
Altura do núcleo (cm)	15,000	15,200	9,600	7,950

No que diz respeito às dimensões apresentadas na Tabela 2, tem-se a Figura 7 demonstrativa das dimensões do núcleo dos transformadores.

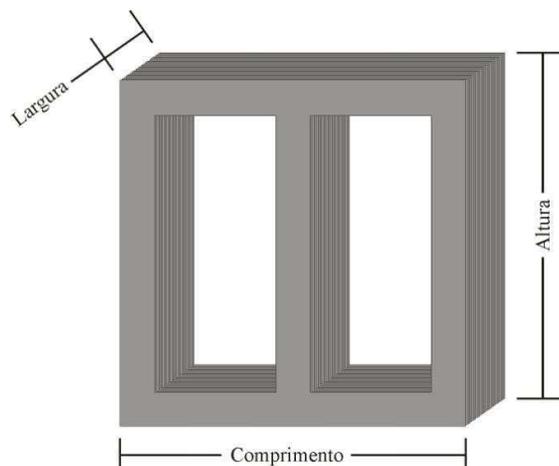


Figura 7. Figura demonstrativa das dimensões do núcleo dos transformadores

As fotografias dos quatro transformadores utilizados estão apresentadas nas Figuras 8 e 9.



(a)



(b)

Figura 8. Fotografias dos transformadores com referências (a) LA1k e (b) FS1k.



(a)



(b)

Figura 9. Fotografias dos transformadores com referências FS100 e FS60, respectivamente.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL

Na realização dos procedimentos experimental e computacional, utilizados para cada uma das amostras, foram seguidas as seguintes etapas:

- Realizou-se o teste de circuito aberto para diferentes frequências de excitação;
- Utilizou-se uma faixa de frequência de 60 a 2600 Hz para realização do ensaio de circuito aberto;
- Mediram-se os sinais de tensão e corrente utilizando um sensor de tensão e um sensor de corrente (com relação de transformação de 100 mV/A);
- Registraram-se as tensões e as correntes de excitação por meio de um osciloscópio digital de quatro canais (taxa de amostragem de 1 GS/s);
- Enviaram-se os sinais de tensão e corrente para o ambiente Matlab[®], onde uma rotina foi desenvolvida para processar os sinais de tensão e corrente de excitação;
- Determinaram-se os parâmetros do núcleo, como função da frequência, utilizando os sinais de tensão e corrente como dados de entrada;
- Utilizou-se o método dos Mínimos Quadrados para determinação das expressões analíticas que modelam a corrente de excitação e os parâmetros do núcleo como função da frequência;
- Utilizou-se o coeficiente de determinação para avaliar o grau de adequação das expressões analíticas com relação aos valores observados;
- Utilizou-se o MQR para determinar as componentes harmônicas da corrente de excitação.

O ensaio de circuito aberto foi realizado no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) mantendo os transformadores em vazio e aplicando-se tensão de alimentação nominal senoidal com frequência variável, utilizando uma fonte de alimentação de frequência programável com as seguintes especificações: tensão de alimentação de 0 a 400 V, frequência de excitação de 40 a 5.000 Hz e potência de 3 kVA.

Uma fotografia da plataforma experimental montada para realização do procedimento experimental adotado está apresentada na Figura 10.

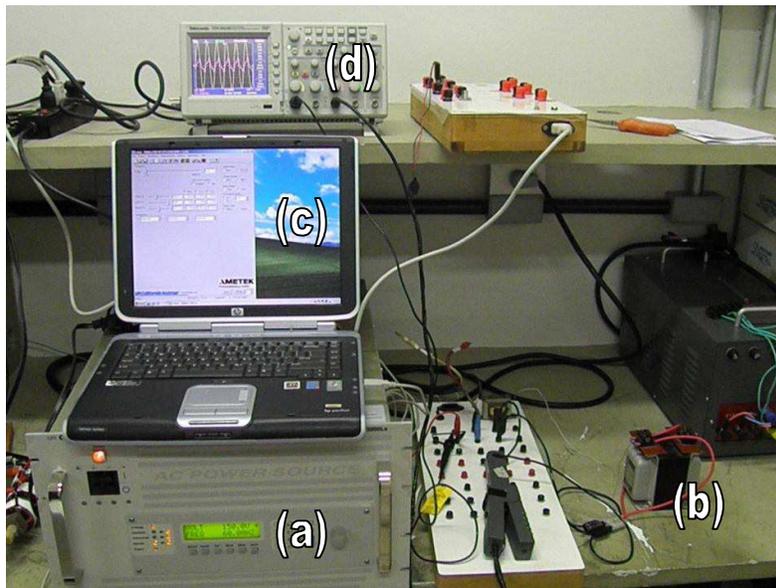


Figura 10. Fotografia da plataforma experimental montada para realização do procedimento experimental utilizado, em que: a) fonte de alimentação, b) transformador, c) computador que controla a fonte e d) osciloscópio.

O diagrama de blocos que representa a metodologia empregada está ilustrado na Figura 11.

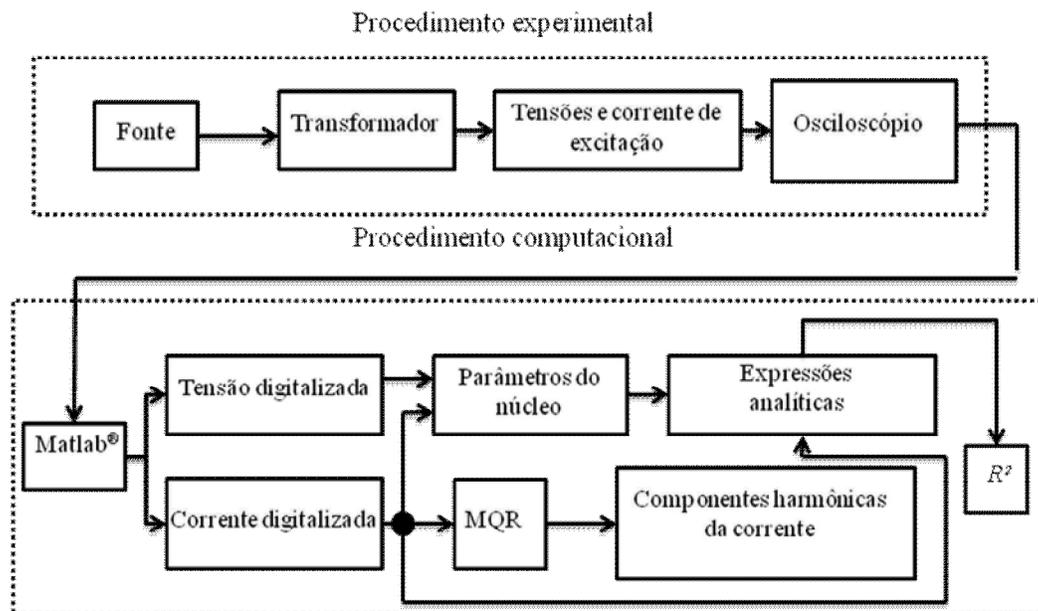


Figura 11. Diagrama de blocos representativo da metodologia empregada.

É importante salientar que o domínio da metodologia adotada está na utilização de tensões de alimentação puramente senoidais, para o ponto de operação correspondente ao ensaio de circuito aberto. A abrangência é que esta metodologia pode ser utilizada para qualquer transformador monofásico de baixa potência com potência nominal até 1 kVA, a qual foi a potência limite usada neste trabalho.

5 RESULTADOS

Não seções subsequentes são apresentadas a análise das medições; as respostas em frequência das correntes de excitação, das componentes harmônicas da corrente de excitação, das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação; as expressões analíticas que representam a corrente e os parâmetros do núcleo como função da frequência e comparações acerca das respostas dos quatro transformadores utilizados.

Além disso, é importante ressaltar que para a avaliação dos resultados obtidos neste trabalho, as impedâncias representadas no circuito elétrico equivalente, apresentado na Figura 3, estão relacionadas com as componentes de tensão e corrente na frequência fundamental referente a cada frequência de excitação aplicada, e, por isso, a corrente I_e é representativa da componente fundamental.

Ademais, um experimento foi realizado para verificar a porcentagem de terceira e quinta harmônicas de tensão de alimentação fornecidas pela fonte. Assim, a fonte proporcionou harmônicas de terceira e quinta ordem inferiores a 0,1% e 0,04%, respectivamente. Comprovando que a tensão de alimentação fornecida pela fonte é bastante próxima da senoidal.

5.1 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES

Os sinais de tensão no secundário e corrente no primário foram registrados para os quatro transformadores, cujas especificações estão na Tabela 2.

Para efeito ilustrativo, são apresentadas nas Figuras 12 a 19 as formas de onda em frequências distintas: da tensão, no secundário; e corrente de excitação, no primário.

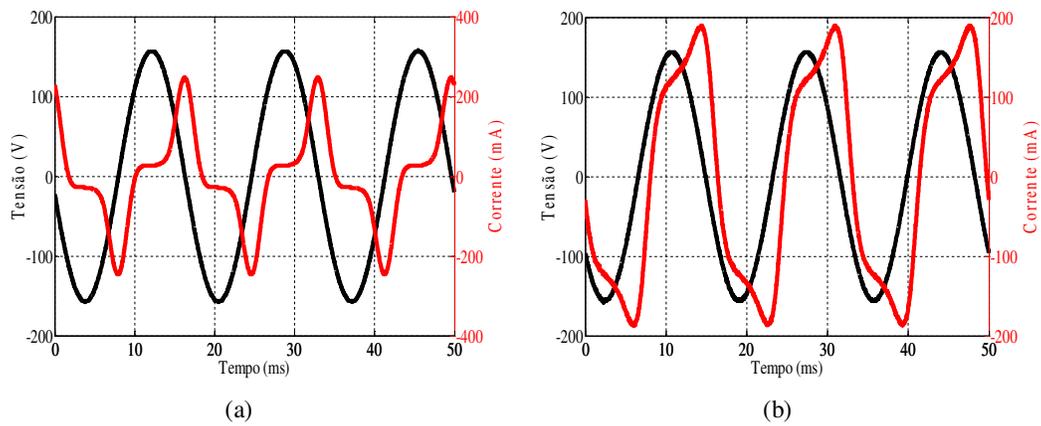


Figura 12. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 60 Hz, em que: (a) LA1k e (b) FS1k.

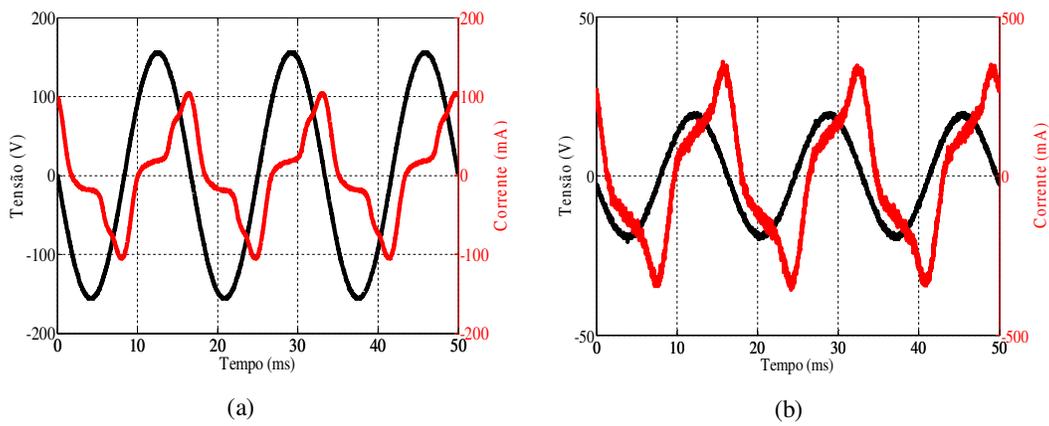


Figura 13. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 60 Hz, em que: (a) FS100 e (b) FS60.

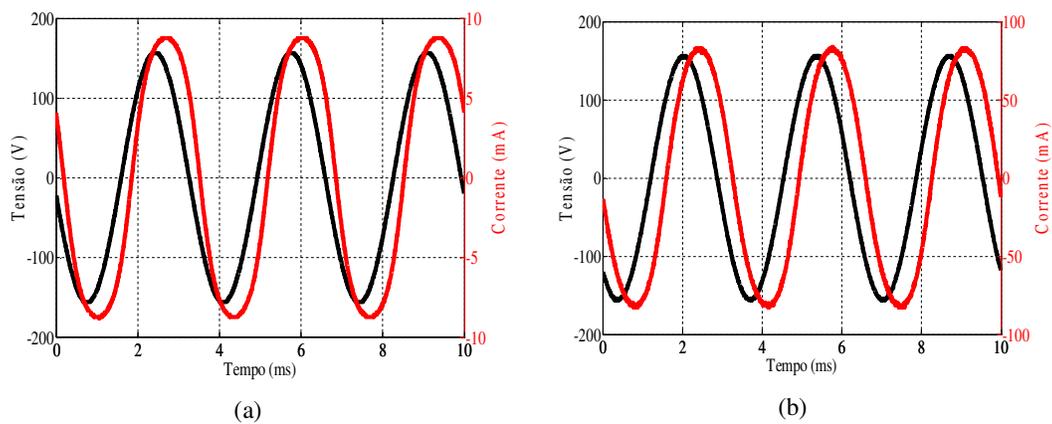


Figura 14. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 300 Hz, em que: (a) LA1k e (b) FS1k.

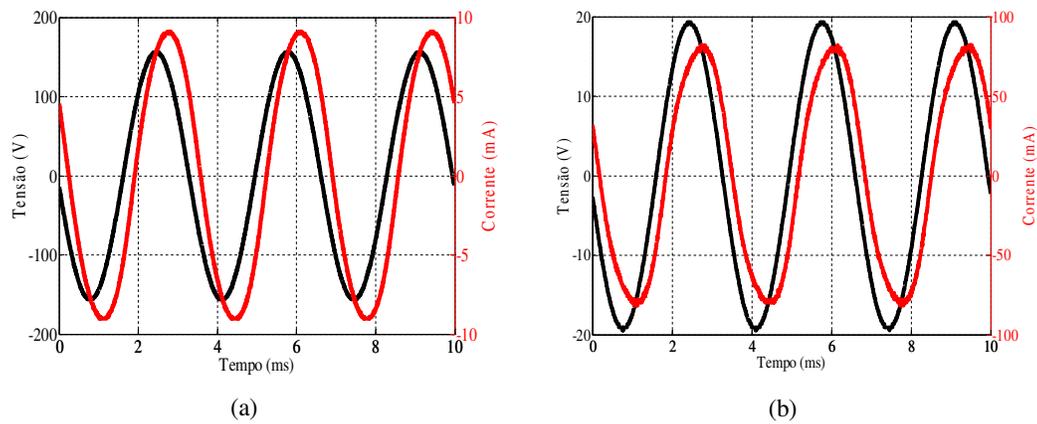


Figura 15. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 300 Hz, em que: (a) FS100 e (b) FS60.

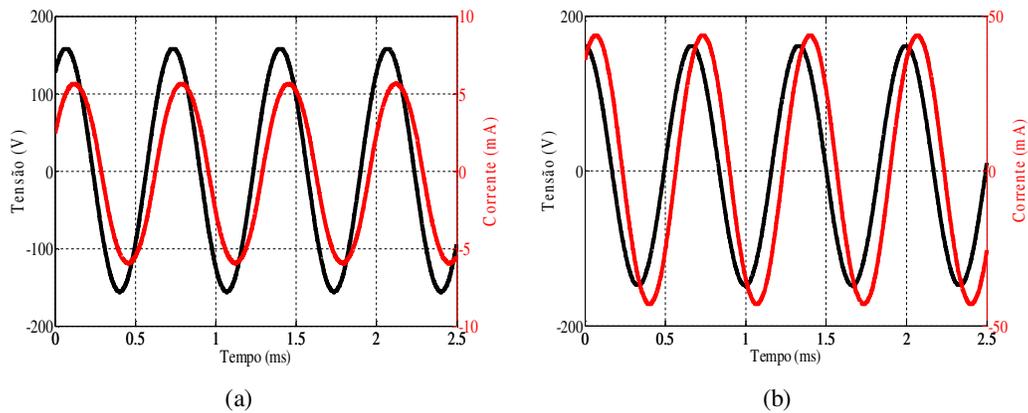


Figura 16. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 1500 Hz, em que: (a) LA1k e (b) FS1k.

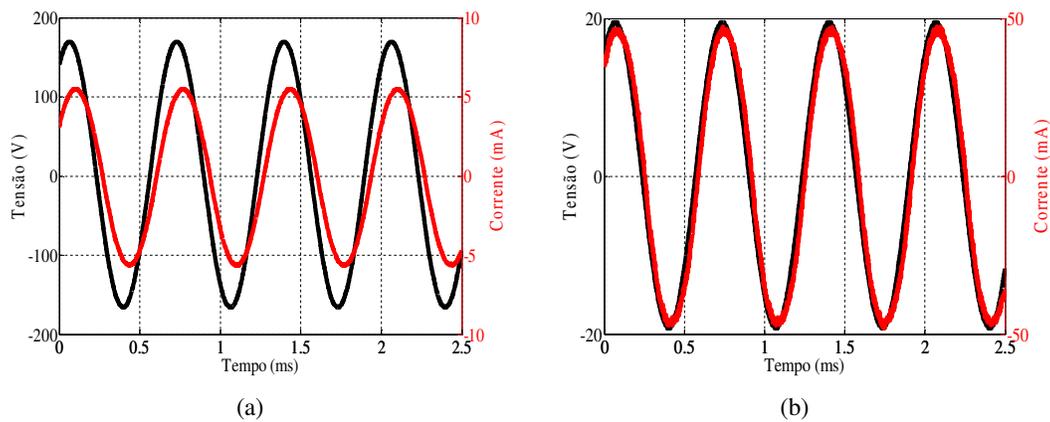


Figura 17. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 1500 Hz, em que: (a) FS100 e (b) FS60.

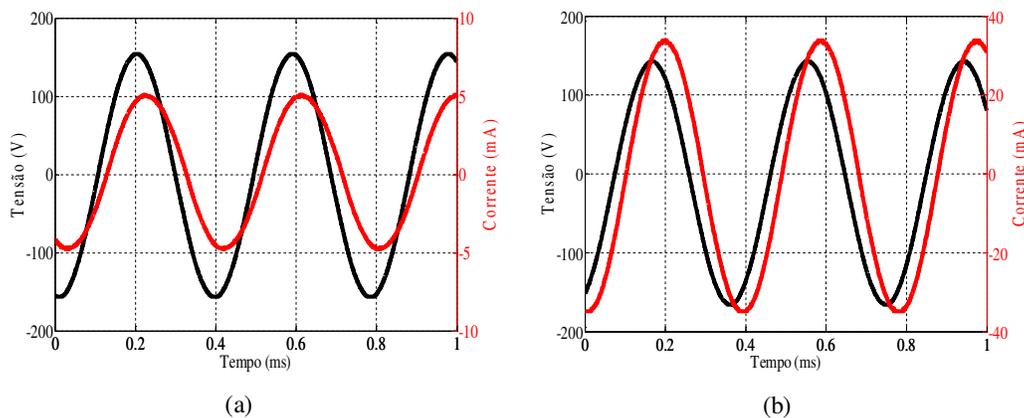


Figura 18. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 2580 Hz, em que: (a) LA1k e (b) FS1k.

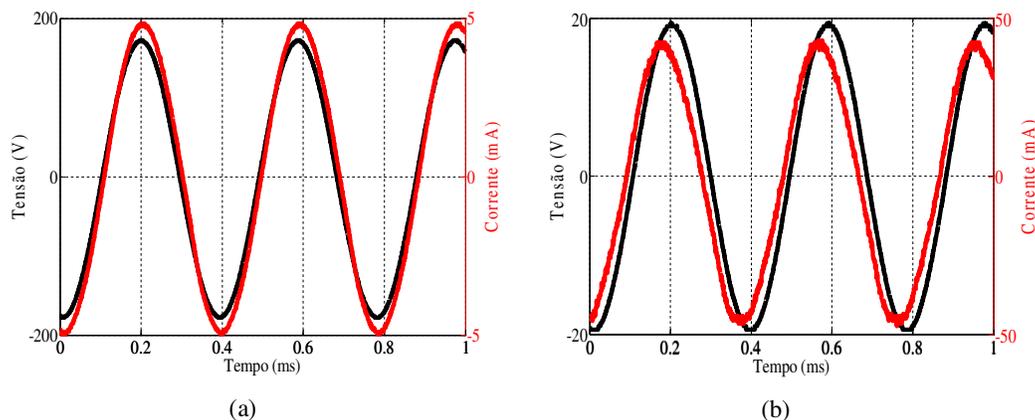


Figura 19. Sinais de tensão (preto) e corrente de excitação (vermelho) para 2580 Hz, em que: (a) FS100 e (b) FS60.

Nas Figuras 12 a 19, observam-se que os sinais de corrente de excitação ficam menos distorcidos à medida que a frequência é elevada. Aparentemente, as harmônicas da corrente de excitação tendem a diminuir com o aumento da frequência. Além disso, verifica-se que as amplitudes das correntes de excitação reduzem à medida que a frequência de excitação é elevada. As diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação também tendem a reduzir com o aumento da frequência, chegando a tomar um comportamento capacitivo em alguns casos. Desta forma, pode-se perceber que a frequência influencia a corrente de excitação em termos de amplitude, fase e grau de distorção.

5.2 RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DAS CORRENTES DE EXCITAÇÃO

Os valores *RMS* da corrente de excitação do transformador, em função da frequência, foram obtidos para cada um dos transformadores e os resultados estão apresentados nas Figuras 20 e 21.

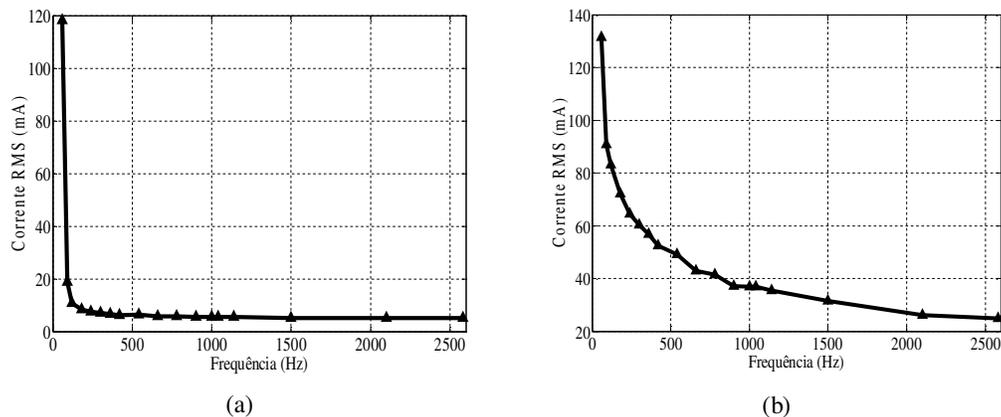


Figura 20. Resposta em frequência das corrente de excitação para (a) LA1k e (b) FS1k.

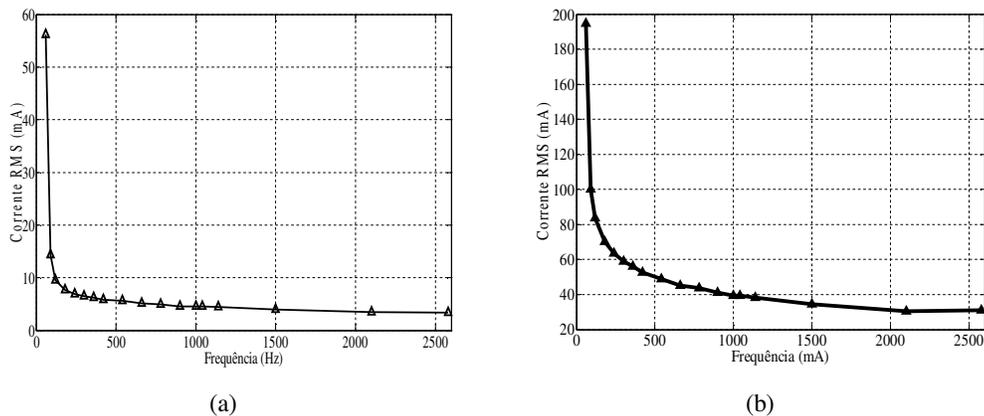
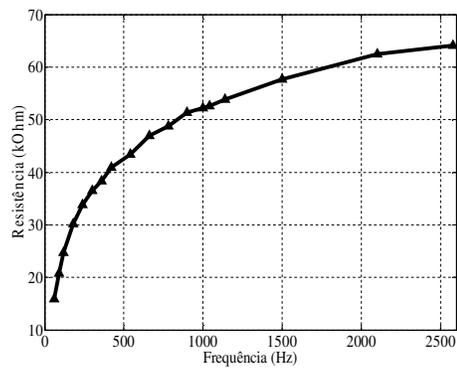
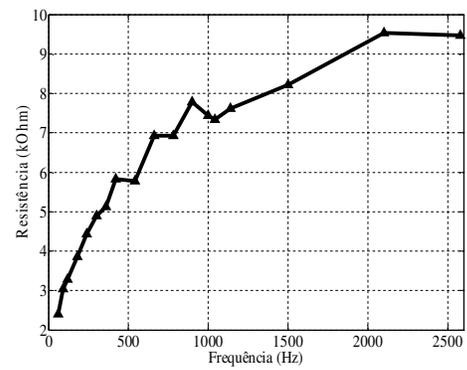


Figura 21. Resposta em frequência das correntes de excitação para (a) FS100 e (b) FS60.

Nas Figuras 20 e 21 verifica-se que a elevação da frequência ocasiona a diminuição dos valores de corrente de excitação. Isso acontece porque o aumento da frequência acarreta o aumento da reatância de magnetização e a redução da área de circulação da corrente nos condutores, causando o aumento da resistência representativa das perdas no núcleo, ocasionando, conseqüentemente, a diminuição da corrente de excitação. Isto pode ser visualizado nas Figuras 22 a 25.

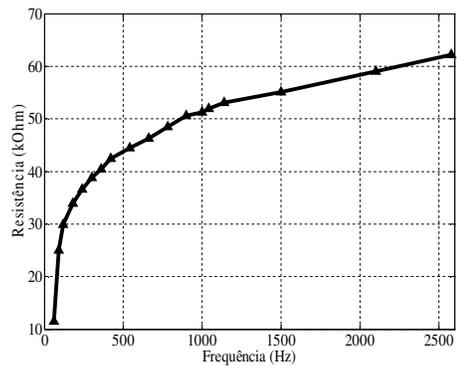


(a)

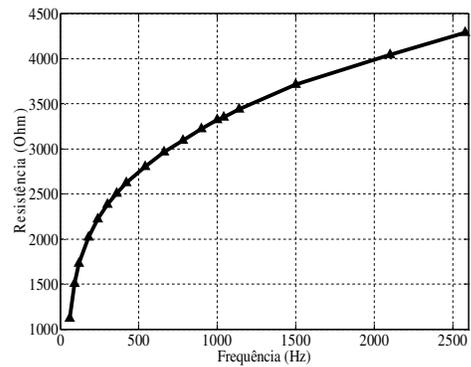


(b)

Figura 22. Respostas em frequência das resistências representativas das perdas no núcleo para (a) LA1k e (b) FS1k.

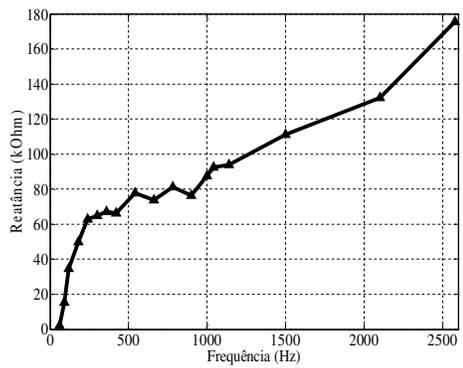


(a)

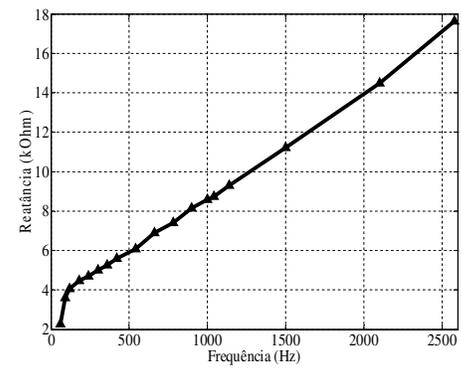


(b)

Figura 23. Respostas em frequência das resistências representativas das perdas no núcleo para (a) FS100 e (b) FS60.



(a)



(b)

Figura 24. Respostas em frequência das reatâncias de magnetização para (a) LA1k e (b) FS1k.

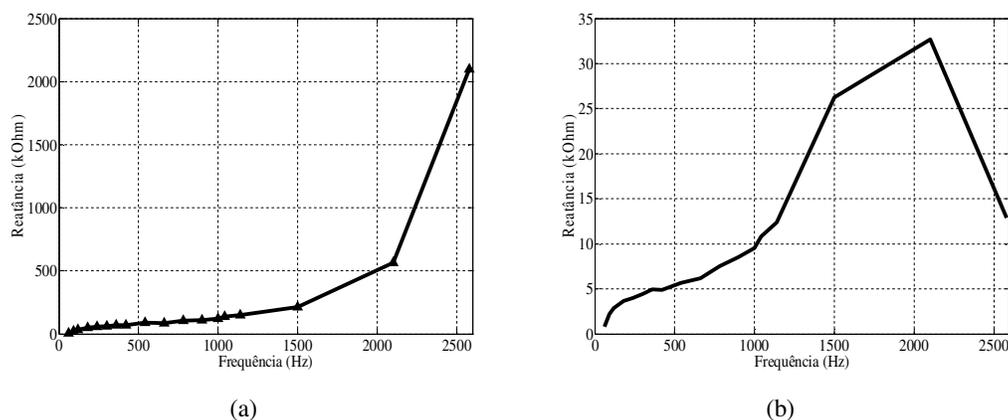


Figura 25. Respostas em frequência das reatâncias de magnetização para (a) FS100 e (b) FS60.

Os resultados observados nas Figuras 22 a 25 justificam a diminuição da corrente de excitação quando da elevação da frequência, pois ocorre o aumento das resistências representativas das perdas no núcleo e também da reatância de magnetização com a elevação da frequência. Além disso, o comportamento capacitivo do transformador FS60 em 2580 Hz, na Figura 25 (b), foi suficiente para causar a redução da reatância de magnetização para esta frequência.

5.3 RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO

As componentes harmônicas das correntes de excitação dos quatro transformadores utilizados foram determinadas mediante o uso do MQR. Desta forma, as respostas em frequência das amplitudes das componentes harmônicas das correntes de excitação estão nas Figuras 26 a 29.

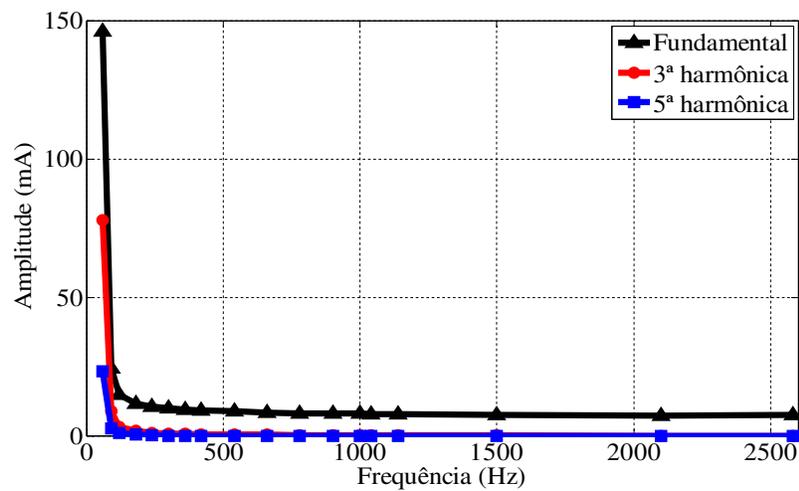


Figura 26. Respostas em frequências das componentes harmônicas da corrente de excitação para LA1k.

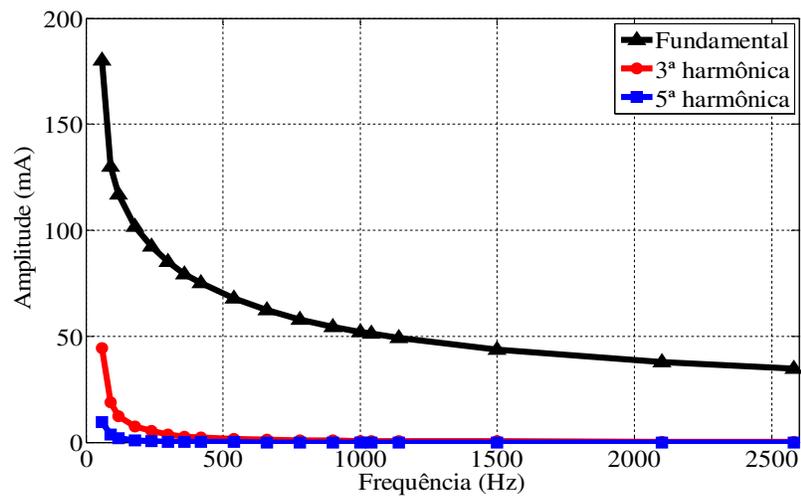


Figura 27. Respostas em frequências das componentes harmônicas da corrente de excitação para FS1k.

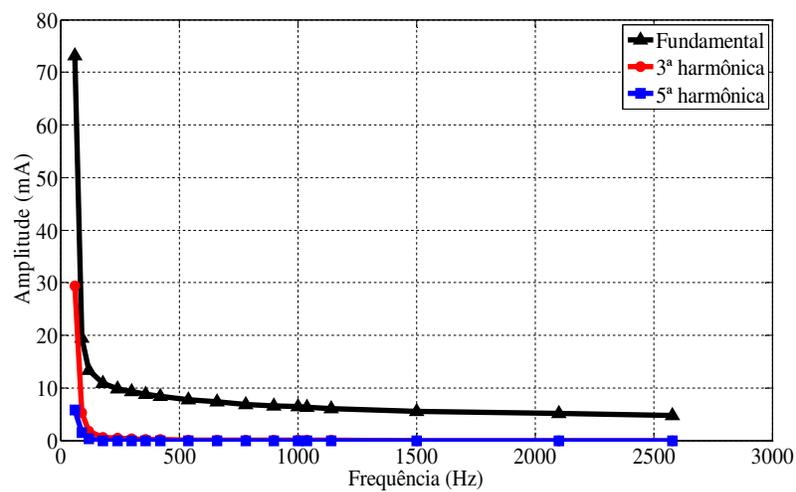


Figura 28. Respostas em frequências das componentes harmônicas da corrente de excitação para FS100.

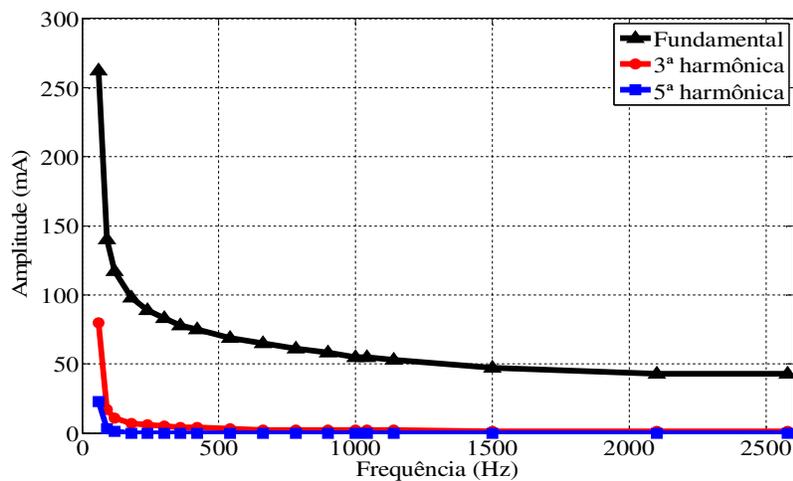


Figura 29. Respostas em frequências das componentes harmônicas da corrente de excitação para FS60.

As porcentagens da terceira e quinta harmônicas das correntes de excitação, para cada frequência de excitação imposta nos transformadores sob ensaio, estão nas Figuras 30 a 33.

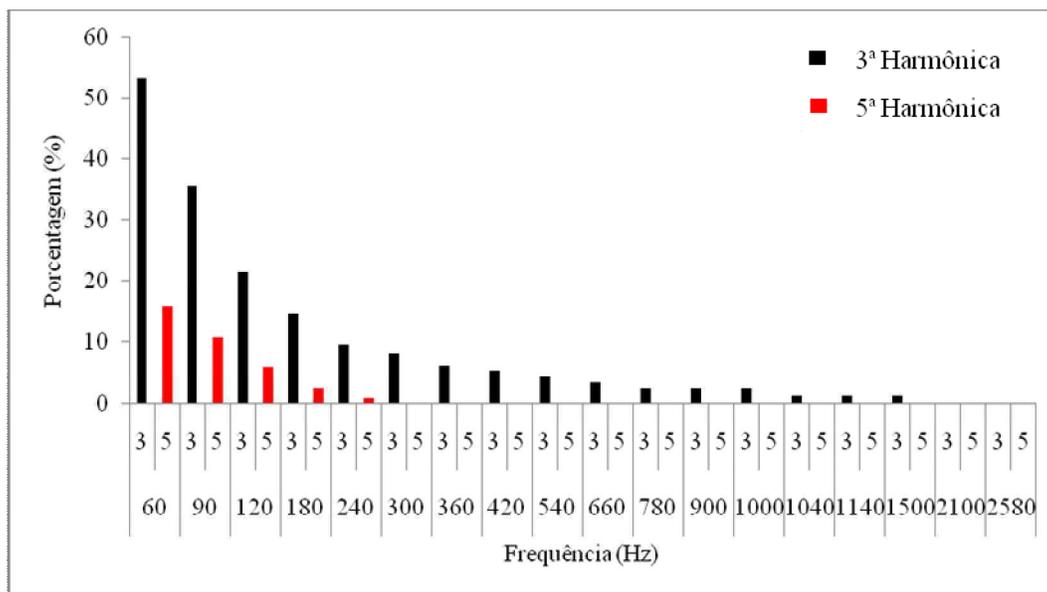


Figura 30. Porcentagens da terceira e quinta harmônicas da corrente de excitação para cada frequência de excitação em LA1k.

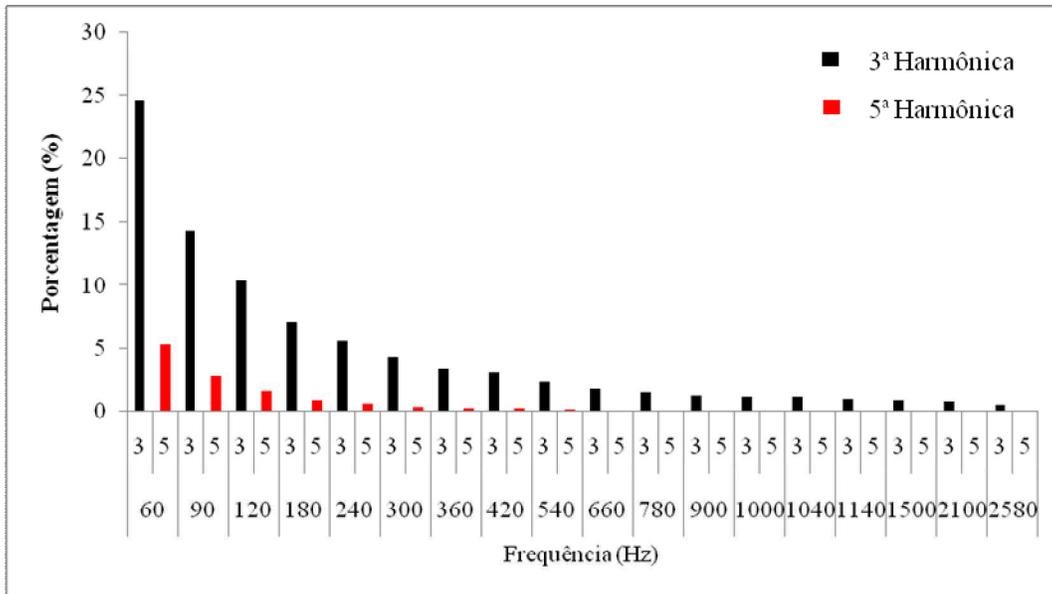


Figura 31. Porcentagens da terceira e quinta harmônicas da corrente de excitação para cada frequência de excitação em FS1k.

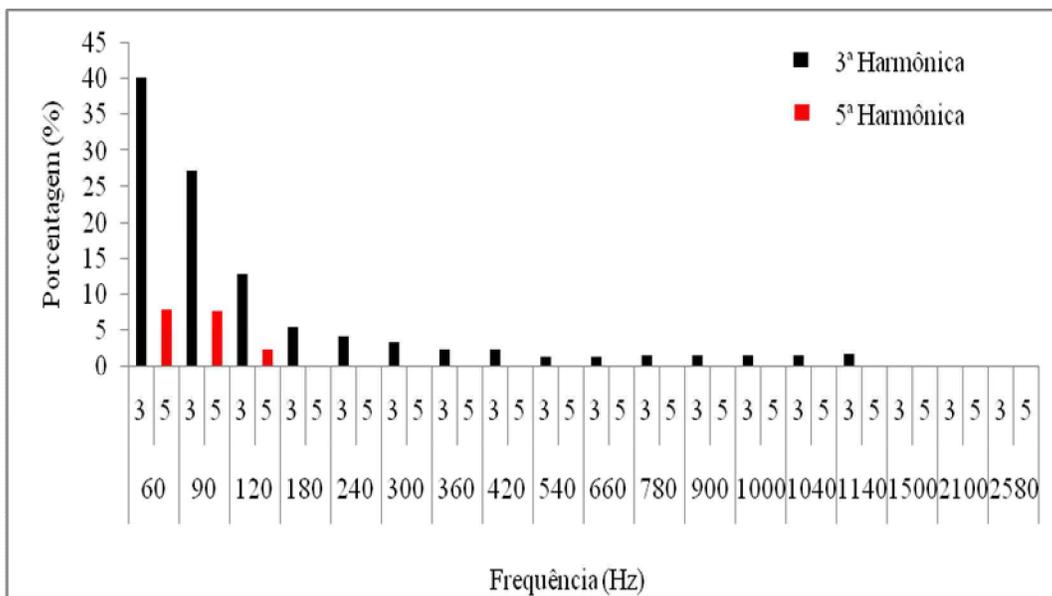


Figura 32. Porcentagens da terceira e quinta harmônicas da corrente de excitação para cada frequência de excitação em FS100.

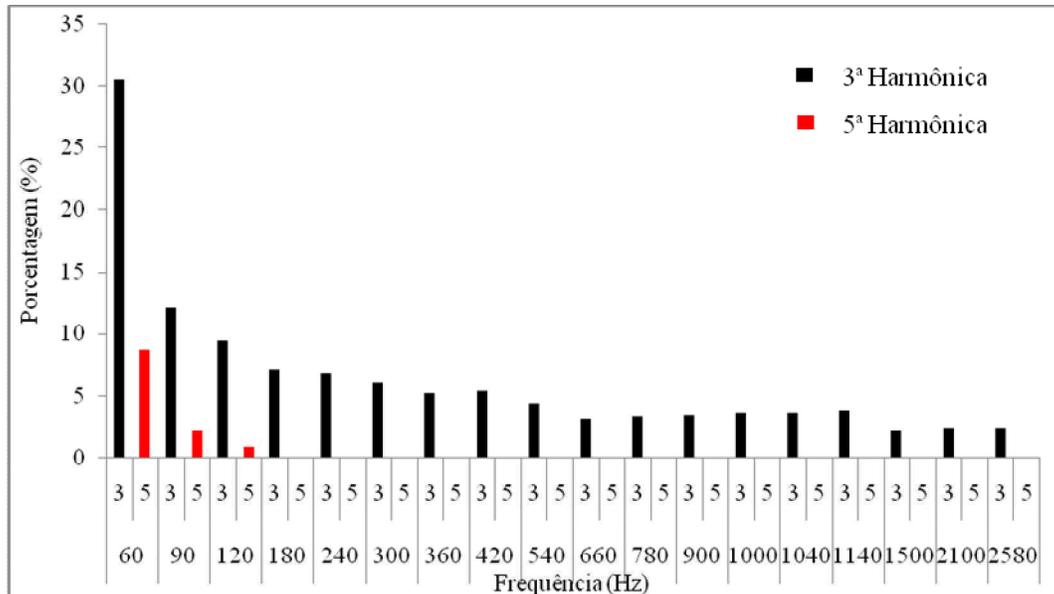


Figura 33. Porcentagens da terceira e quinta harmônicas da corrente de excitação para cada frequência de excitação em FS60.

Os gráficos apresentados nas Figuras 26 a 33 representam a fundamental, terceira e quinta harmônicas dos sinais de corrente de excitação para cada frequência de excitação imposta ao transformador. Observa-se a redução das amplitudes das componentes harmônicas do sinal de corrente de excitação nos transformadores, conforme a frequência é elevada. Essa redução das amplitudes das componentes harmônicas do sinal de corrente de excitação também foi evidenciada nas Figuras 12 a 19, nas quais as formas de onda dos sinais de corrente, para frequências mais elevadas, aproximam-se da forma de onda senoidal.

5.4 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DAS DIFERENÇAS DE FASE ENTRE TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO E CORRENTE DE EXCITAÇÃO

Os resultados obtidos para as diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação estão apresentados nas Figuras 34 e 35.

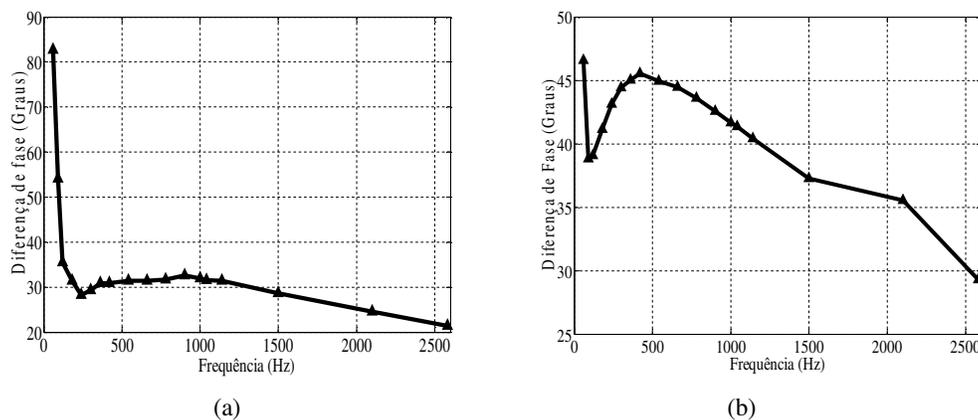


Figura 34. Respostas em frequência das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e da corrente de excitação para (a) LA1k e (b) FS1k.

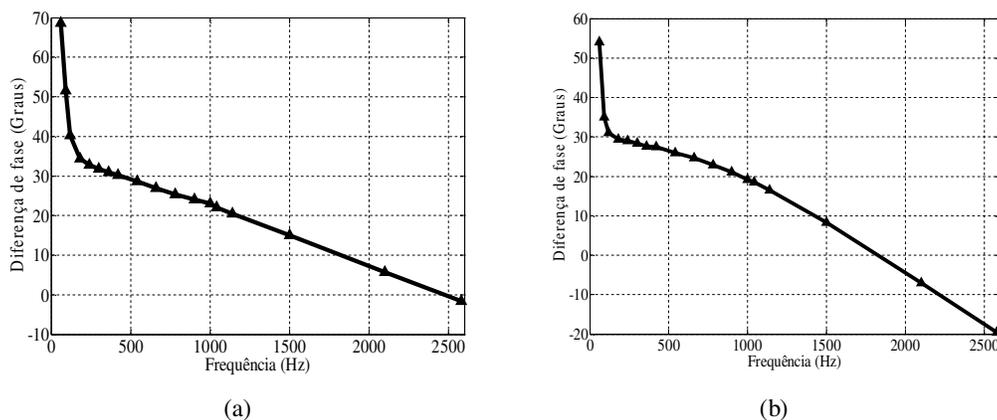


Figura 35. Respostas em frequência das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e da corrente de excitação para (a) FS100 e (b) FS60.

Nas Figuras 34 e 35 verificam-se a redução das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação. Deste modo, a elevação da frequência faz com que os efeitos causados pelas capacitâncias, entre os enrolamentos e entre os enrolamentos e a terra, sejam mais significativos, resultando na redução da diferença de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação.

Nas Figuras 34 (a) e (b) observam-se que em uma faixa localizada nas médias frequências ocorreu um aumento da diferença de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação. Mais especificamente, para LA1k ocorreu entre 300 e 540 Hz e para FS1k entre 150 e 500 Hz. Atribui-se este comportamento à variação dos valores de resistência dos enrolamentos e de reatância de dispersão com a frequência. Assim, o aumento da diferença de fase ocorre quando a variação da

reatância de dispersão é maior que a variação da resistência dos enrolamentos, que foi o que ocorreu nas faixas de frequências citadas. Isso pode ser observado nas Figuras 36 a 38, em que são apresentados, para essa faixa de interesse, os valores da resistência dos enrolamentos e reatância de dispersão, estimados pelo MQR, assim como suas respectivas variações de valor.

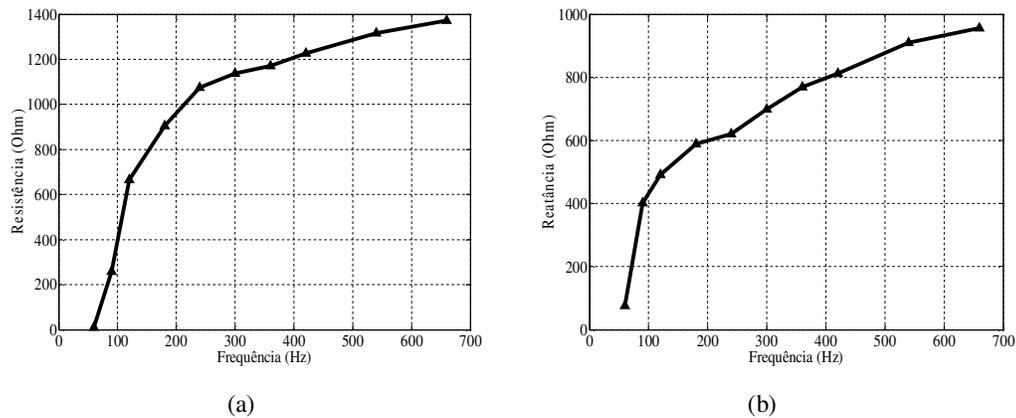


Figura 36. Resposta em frequência da (a) resistência dos enrolamentos e da (b) reatância de dispersão para LA1k.

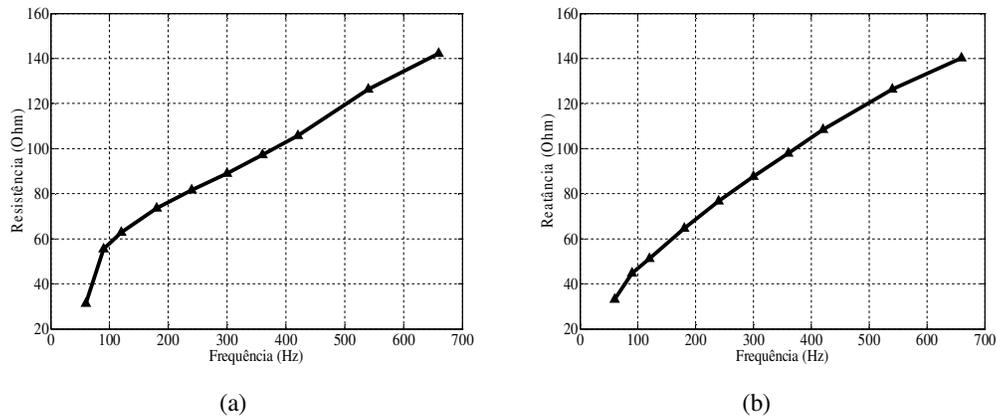


Figura 37. Resposta em frequência da (a) resistência dos enrolamentos e da (b) reatância de dispersão para FS1k.

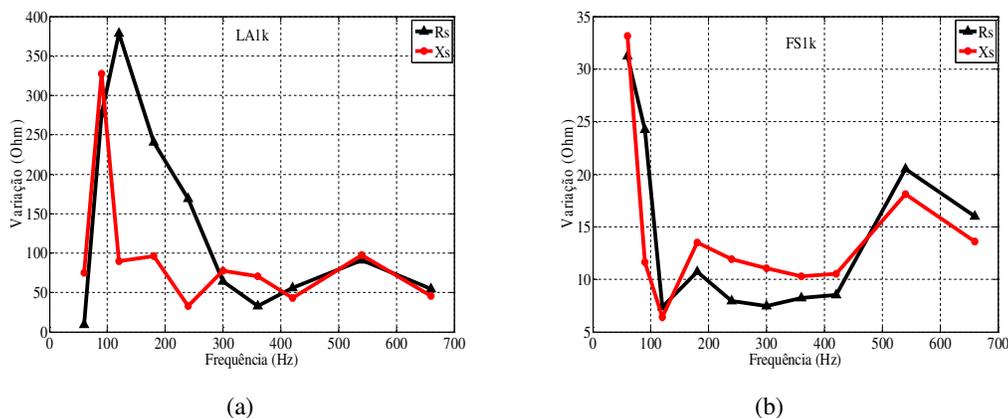


Figura 38. Variação do valor da resistência dos enrolamentos (preto) e da reatância de dispersão (vermelho) para (a) LA1k e (b) FS1k.

Nas Figuras 36 e 37 percebem-se o aumento da resistência dos enrolamentos e da reatância de dispersão com a elevação da frequência, para a faixa de frequências considerada. Na Figura 38 verifica-se a causa do aumento das diferenças de fase para os transformadores LA1k e FS1k, em que para LA1k a variação de X_s é maior do que a variação R_s justamente entre 300 e 540 Hz, e para FS1k esse mesmo comportamento ocorre entre 150 e 500 Hz. Isso pode ser mais bem observado nas Figuras 39 e 40.

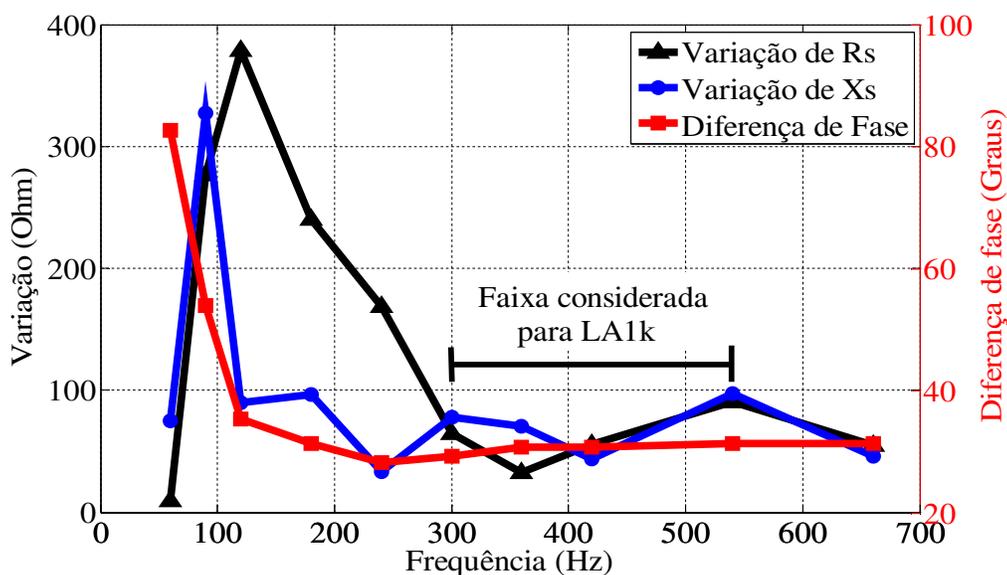


Figura 39. Diferença de fase e variação do valor da resistência dos enrolamentos e da reatância de dispersão, para a faixa de frequência considerada em LA1k.

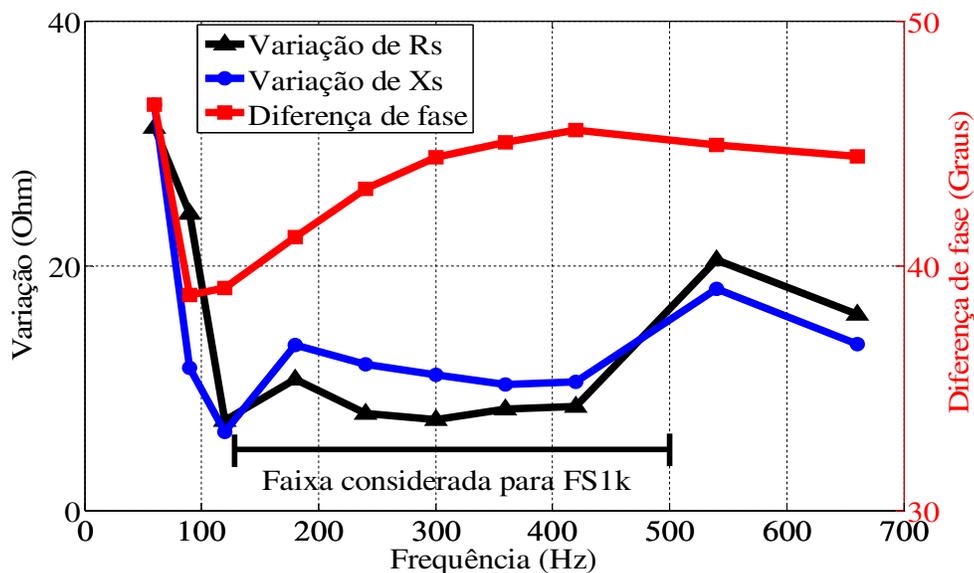


Figura 40. Diferença de fase e variação do valor da resistência dos enrolamentos e da reatância de dispersão, para a faixa de frequência considerada em FS1k.

Ainda comparando LA1k e FS1k percebe-se que o efeito das capacitâncias é mais significativo em LA1k do que em FS1k, uma vez que em frequências mais elevadas a redução da diferença de fase para LA1k é maior que para FS1k. Essa característica está relacionada com a maneira como as bobinas foram enroladas e também com as propriedades físicas do material empregado no núcleo do transformador (PIENIZ, 2006).

Desta forma, segundo Wang e outros (2003), o uso de núcleos de tamanho mais elevado e o maior espaçamento entre as bobinas permite reduzir o efeito das capacitâncias.

Como o volume do núcleo de LA1k é 32,6% menor que o do FS1k (LUCIANO, 1995), isso proporcionou um efeito mais significativo das capacitâncias no LA1k comparado ao FS1k. Além disso, verifica-se que o efeito indutivo em LA1k é menor que o de FS1k devido à área de LA1k ser inferior a de FS1k e também ao valor da resistência dos enrolamentos de LA1k ser maior que sua respectiva reatância de dispersão comparado a FS1k.

5.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

Expressões analíticas, que modelam as correntes de excitação como função da frequência e os seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), foram determinadas mediante o uso do MQR. Para tanto, foram utilizadas as repostas em frequência das correntes de excitação. Isto pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3. Expressões analíticas que modelam a corrente de excitação como função da frequência.

Transformador	Expressão Analítica	R^2
LA1k	$I(f) = 0,2173 \cdot e^{-0,0204 \cdot f} + 0,0666 \cdot e^{-0,0005 \cdot f}$	0,9992
FS1k	$I(f) = 9,7030 \cdot e^{-0,0745 \cdot f} + 0,0076 \cdot e^{-0,0002 \cdot f}$	0,9786
FS100	$I(f) = 1,992 \cdot e^{-0,0618 \cdot f} + 0,0074 \cdot e^{-0,0004 \cdot f}$	0,9864
FS60	$I(f) = 1,198 \cdot e^{-0,0371 \cdot f} + 0,066 \cdot e^{-0,0004 \cdot f}$	0,9981

Com os resultados apresentados na Tabela 3 pode-se perceber que as expressões analíticas do tipo soma de exponenciais ajustam-se satisfatoriamente aos valores de correntes de excitação medidos para cada frequência, uma vez que o R^2 de todas as expressões foi próximo à unidade.

Desta forma, verifica-se que expressões analíticas do tipo soma de exponenciais modela com elevada exatidão a corrente de excitação como função da frequência. Isto também pode ser observado na construção das curvas de corrente de excitação como função da frequência, as quais podem ser visualizadas nas Figuras 41 e 42.

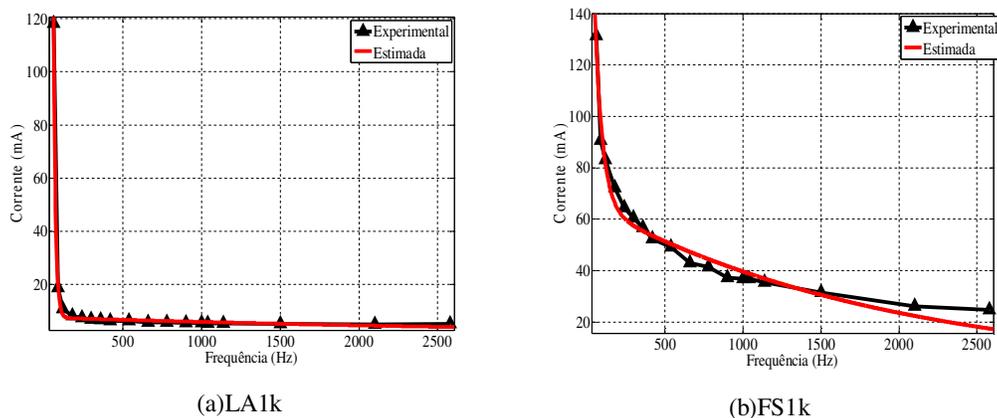


Figura 41. Valores eficazes da corrente de excitação (preto) e curva estimada (vermelho) para (a) LA1k e (b) FS1k.

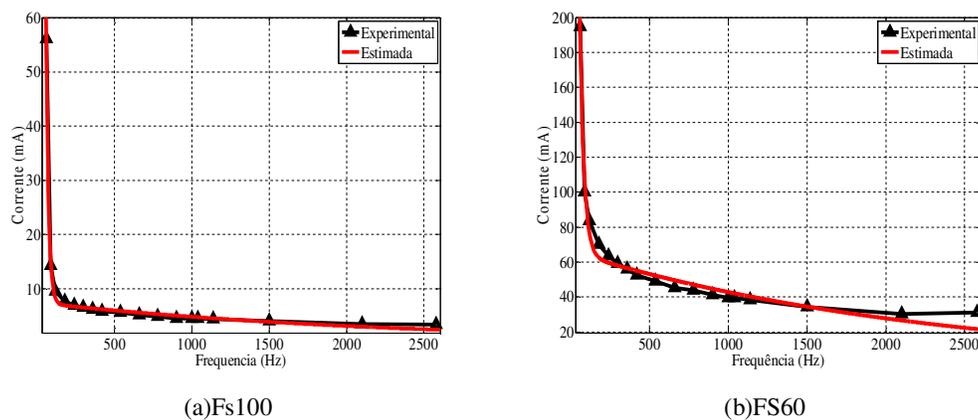


Figura 42. Valores eficazes da corrente de excitação (preto) e curva estimada (vermelho) para (a) FS100 e (b) FS60.

5.6 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS PARÂMETROS DO NÚCLEO COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

Expressões analíticas, que modelam os parâmetros do núcleo como função da frequência e seus respectivos R^2 , foram determinadas mediante o uso do MQR. Para tanto, as respostas em frequência dos parâmetros do núcleo foram utilizadas.

A seguir são apresentadas as expressões analíticas que modelam a resistência representativa das perdas do núcleo e a reatância de dispersão como função da frequência.

5.6.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS RESISTÊNCIAS REPRESENTATIVAS DAS PERDAS NO NÚCLEO COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

Expressões analíticas que modelam as resistências representativas das perdas no núcleo como função da frequência e seus respectivos R^2 foram determinadas. Esses resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4. Expressões analíticas que modelam a resistência representativa das perdas no núcleo como função da frequência.

Transformador	Expressão Analítica	R^2
LA1k	$R_m^{LA1k}(f) = -0,0113 \cdot f^2 + 42,39 \cdot f + 21230$ (*)	0,9480
	$R_m^{LA1k}(f) = 46530 \cdot e^{0,0001 \cdot f} - 36580 \cdot e^{-0,0036 \cdot f}$ (**)	0,9956
FS1k	$R_m^{FS1k}(f) = -0,0014 \cdot f^2 + 6,256 \cdot f + 2806$ (*)	0,9620
	$R_m^{FS1k}(f) = 6913 \cdot e^{0,0001 \cdot f} - 5191 \cdot e^{-0,0026 \cdot f}$ (**)	0,9880
FS100	$R_m^{FS100}(f) = -0,0093 \cdot f^2 + 37,57 \cdot f + 24230$ (*)	0,8692
	$R_m^{FS100}(f) = 42820 \cdot e^{0,0001 \cdot f} - 44380 \cdot e^{-0,0079 \cdot f}$ (**)	0,9740
FS60	$R_m^{FS60}(f) = -0,0005 \cdot f^2 + 2,419 \cdot f + 1500$ (*)	0,9511
	$R_m^{FS60}(f) = 2818 \cdot e^{0,0001 \cdot f} - 2038 \cdot e^{-0,0041 \cdot f}$ (**)	0,9950

(*) Funções polinomiais de segundo grau.

(**) Funções do tipo soma de exponenciais.

Ao observar a Tabela 4 verifica-se que as expressões (**) modelam mais satisfatoriamente a resistência representativa das perdas no núcleo como função da frequência quando comparada à (*), proposta por Meister e Oliveira (2009). Esta

conclusão pode ser alcançada observando os valores dos coeficientes de determinação para cada expressão analítica, verificando que os R^2 para as (**) são mais próximos à unidade que os referentes às (*). Isso também está ilustrado nas Figuras 43 a 46.

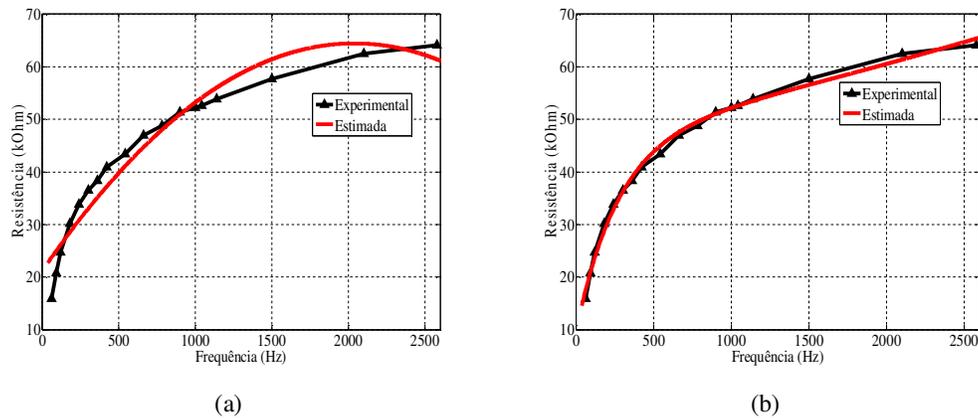


Figura 43. Valores experimentais da resistência representativa das perdas no núcleo (preto) e curva estimada (vermelho) para LA1k, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

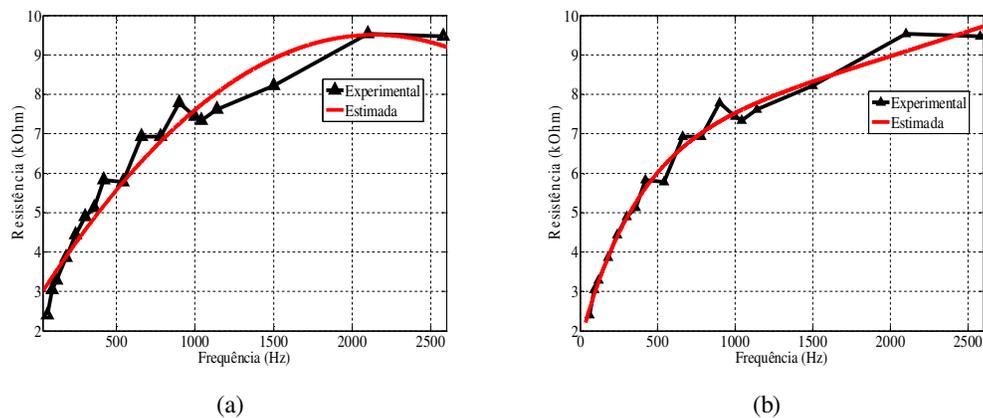


Figura 44. Valores experimentais da resistência representativa das perdas no núcleo (preto) e curva estimada (vermelho) para FS1k, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

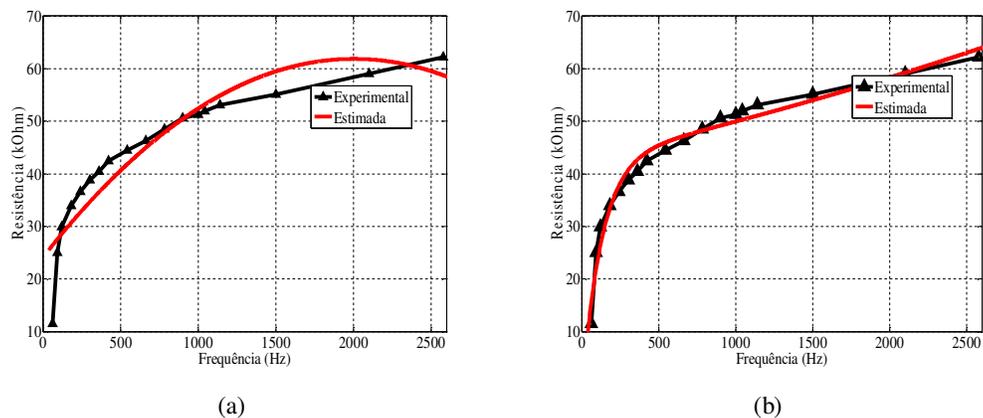


Figura 45. Valores experimentais da resistência representativa das perdas no núcleo (preto) e curva estimada (vermelho) para FS100, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

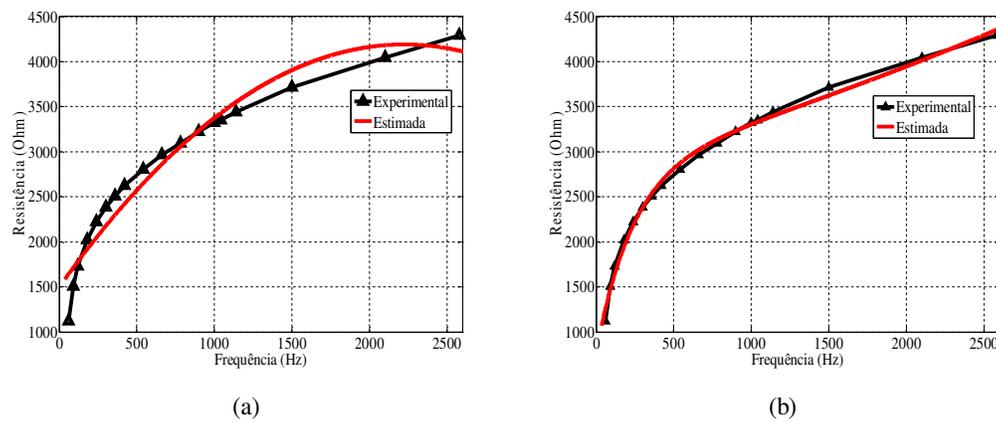


Figura 46. Valores experimentais da resistência representativa das perdas no núcleo (preto) e curva estimada (vermelho) para FS60, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

Desta forma, conclui-se que a resistência representativa das perdas no núcleo como função da frequência pode ser mais bem modelada por função tipo soma de exponenciais.

5.6.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS REATÂNCIAS DE MAGNETIZAÇÃO COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

As expressões analíticas que modelam a reatância de magnetização como função frequência também foram determinadas. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 5.

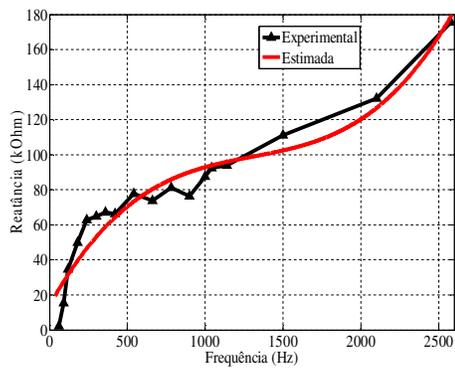
Tabela 5. Expressões analíticas que modelam a reatância de magnetização como função da frequência.

Transformador	Expressão Analítica	R ²
LA1k	$X_m^{LA1k}(f) = (2,821 \times 10^{-5}) \cdot f^3 - 0,1105 \cdot f^2 + 161,3 \cdot f + 13860$ (***)	0,9403
	$X_m^{LA1k}(f) = 57780 \cdot e^{0,0004 \cdot f} - 133300 \cdot e^{-0,0133 \cdot f}$ (**)	0,9907
FS1k	$X_m^{FS1k}(f) = (5,422 \times 10^{-7}) \cdot f^3 - 0,0019 \cdot f^2 + 7,259 \cdot f + 2827$ (***)	0,9945
	$X_m^{FS1k}(f) = 5791 \cdot e^{0,0004 \cdot f} - 3262 \cdot e^{-0,0022 \cdot f}$ (**)	0,9951
FS100	$X_m^{FS100}(f) = 0,0004 \cdot f^3 - 1,2 \cdot f^2 + 934,2 \cdot f - 89840$ (***)	0,9840
	$X_m^{FS100}(f) = 39060 \cdot e^{0,0011 \cdot f} + 3,494 \cdot e^{0,0049 \cdot f}$ (**)	0,9993
FS60	$X_m^{FS60}(f) = (-1,252 \times 10^{-5}) \cdot f^3 + 0,0428 \cdot f^2 - 23,84 \cdot f + 5871$ (***)	0,9187
	$X_m^{FS60}(f) = (-1,501 \times 10^6) \cdot e^{0,0020 \cdot f} + (1,504 \times 10^6) \cdot e^{0,0020 \cdot f}$ (**)	0,9666
FS60 (sem efeito capacitivo)	$X_m^{FS60}(f) = (1,809 \times 10^{-5}) \cdot f^3 - 0,0294 \cdot f^2 + 20,81 \cdot f + 363,8$ (***)	0,9975
	$X_m^{FS60}(f) = 2545 \cdot e^{0,0013 \cdot f} + 0,0001 \cdot e^{0,0115 \cdot f}$ (**)	0,9884

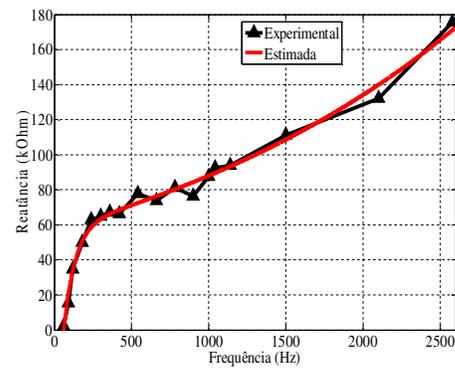
(**) Funções do tipo soma de exponenciais.

(***) Funções polinomiais de terceiro grau.

Ao observar a Tabela 5 verifica-se que as (**) modelam, majoritariamente, mais satisfatoriamente a reatância de magnetização como função da frequência quando comparada à (***), proposta por Meister e Oliveira (2009). Esta conclusão pode ser alcançada observando os valores dos coeficientes de determinação para cada expressão analítica, verificando que os R² para as (**) são mais próximos à unidade que os referentes às (***). Além disso, observa-se que a última linha é composta por mais duas expressões analíticas referentes ao transformador FS60 sem o efeito capacitivo. Isso foi feito para verificar se a modelagem ficava melhor com a retirada dos pontos representativos do comportamento capacitivo. Assim, percebe-se que a modelagem, para esse transformador, ficou melhor quando seu comportamento era predominantemente indutivo. Esses resultados também podem ser visualizados nas Figuras 47 a 51.

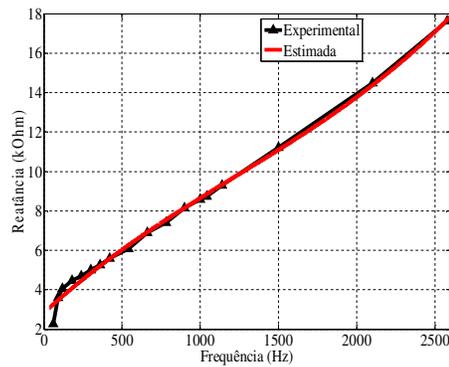


(a)

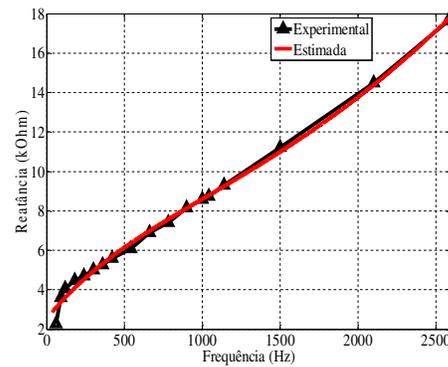


(b)

Figura 47. Valores experimentais da reatância de magnetização (preto) e curva estimada (vermelho) para LA1k, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

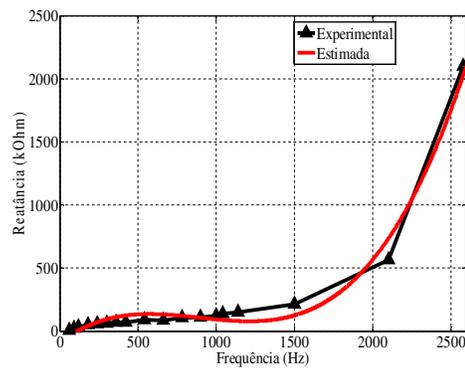


(a)

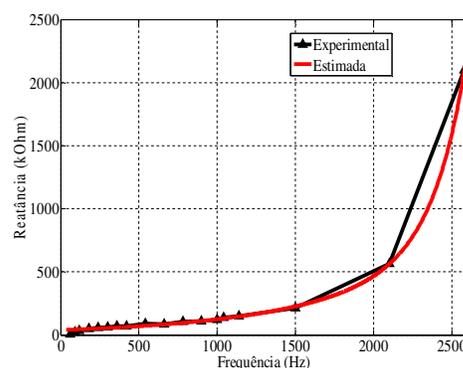


(b)

Figura 48. Valores experimentais da reatância de magnetização (preto) e curva estimada (vermelho) para FS1k, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.



(a)



(b)

Figura 49. Valores experimentais da reatância de magnetização (preto) e curva estimada (vermelho) para FS100, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

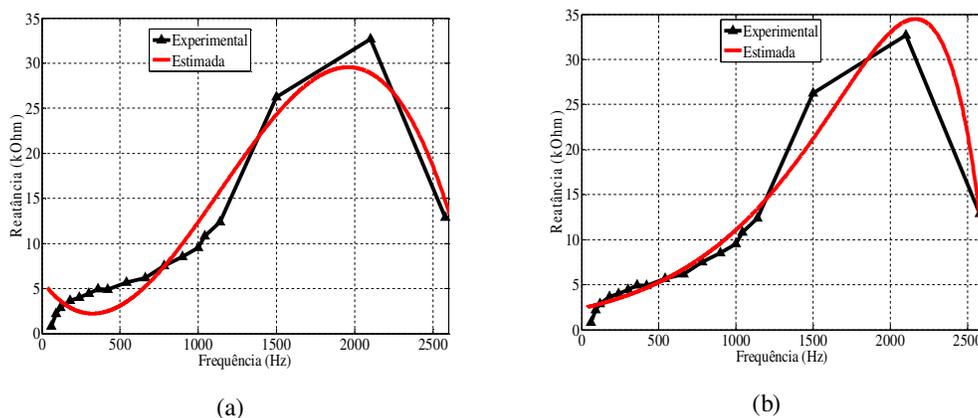


Figura 50. Valores experimentais da reatância de magnetização (preto) e curva estimada (vermelho) para FS60, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

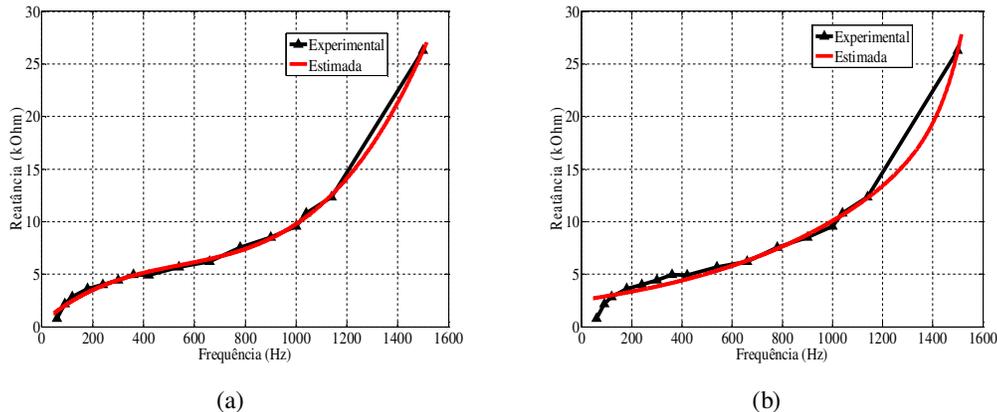


Figura 51. Valores experimentais da reatância de magnetização (preto) e curva estimada (vermelho) para FS60 com comportamento predominantemente indutivo, em que: (a) polinomial e (b) soma de exponenciais.

Ainda considerando o transformador FS60, especificamente a Figura 50, verifica-se que para a faixa de frequências de 0 a 1250 Hz a reatância de magnetização é mais bem representada por funções do tipo soma de exponenciais, enquanto que para a faixa de frequências de 1250 Hz a 2580 Hz a reatância de magnetização é mais bem representada por funções polinomiais. Este fato sinaliza que, em casos onde haja necessidade de uma aderência mais eficiente entre as curvas, possa-se usar composição de ambas as funções.

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que a reatância de magnetização como função da frequência é mais bem representada por funções do tipo soma de exponenciais.

5.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

Ao observar os resultados em conjunto, podem-se fazer algumas considerações. Desta forma, verificaram-se, inicialmente, as respostas em frequência das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação, apresentados na Figura 52.

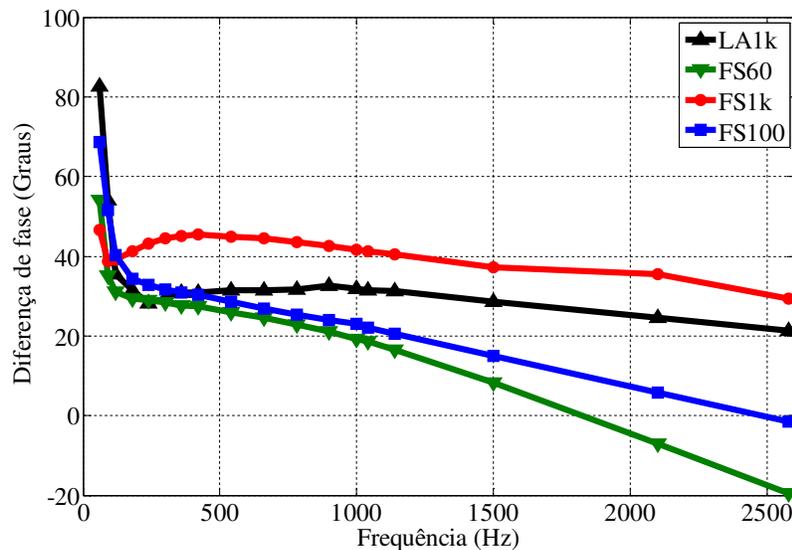


Figura 52. Respostas em frequência das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação dos quatro transformadores.

Como o comportamento capacitivo é mais significativo quando ocorre maior redução da diferença de fase, ao comparar os transformadores de FeSi verifica-se que o efeito capacitivo foi maior no transformador FS60, que é a amostra com menor volume e menor potência, confirmando as afirmações feitas no trabalho de Wang e outros (2003). Desta forma, pode-se dizer que a predominância indutiva dos transformadores, com relação à frequência de excitação, cresce com a potência nominal.

Além disso, percebe-se que para baixas frequências o efeito não linear do ramo de magnetização do transformador apresenta-se mais significativo. Em médias frequências, os impactos causados por este ramo na corrente de excitação são menores. Em frequências mais elevadas a forma de onda da corrente aproxima-se da senoidal, e os efeitos do ramo de magnetização são, praticamente, insignificantes. Entretanto, os efeitos das capacitâncias devem ser levados em consideração. Além disso, as

modelagens por circuitos equivalentes apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6 apresentaram boa aderência aos resultados obtidos experimentalmente.

Assim, os resultados apresentados podem ser utilizados para contribuir com o aprimoramento dos estudos relacionados ao desenvolvimento de modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes para transformadores monofásicos de baixa potência, mediante a análise da resposta em frequência da corrente de excitação. Os resultados podem contribuir para estudos relacionados ao projeto de transformadores para operação em diferentes frequências, simulação e predição, análise de comportamento e avaliação dos índices de qualidade de energia elétrica do equipamento.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi verificada e quantificada a influência da frequência no comportamento da corrente de excitação de transformadores monofásicos de baixa potência em termos de amplitude, fase e grau de distorção. A faixa de frequência empregada foi de 60 a 2580 Hz. Os resultados experimentais e matemáticos evidenciam que:

- Os circuitos equivalentes apresentados para baixas, médias e altas frequências ajustam-se aos resultados experimentais apresentados neste trabalho;
- O comportamento dos transformadores monofásicos de baixa potência foi adequadamente representado pela resposta em frequência da corrente de excitação.
- O valor da corrente de excitação decresce com o aumento da frequência de excitação, consequência do aumento das resistências representativas das perdas no núcleo e das reatâncias de magnetização;
- O decrescimento das amplitudes das componentes harmônicas da corrente de excitação justifica a proximidade da forma de onda da corrente de excitação com a senoide para frequências mais elevadas;
- O efeito das capacitâncias com a elevação da frequência foi confirmado devido à redução das diferenças de fase entre as fundamentais da tensão de alimentação e corrente de excitação;
- Os efeitos das capacitâncias foram maiores para o transformador com menor potência, concluindo que os transformadores com maior potência possuem um maior caráter indutivo, para os exemplares usados neste trabalho;
- Os efeitos das capacitâncias foram maiores no transformador com núcleo de liga amorfa comparado ao de FeSi, uma vez que apresentou maior redução da diferença de fase em frequências mais elevadas;
- Com a modelagem matemática verificou-se que funções do tipo soma de exponenciais modelam adequadamente a corrente de excitação em

função da frequência, uma vez que seus respectivos coeficientes de determinação foram próximos à unidade;

- Com a modelagem matemática verificou-se que funções do tipo soma de exponenciais modelam mais satisfatoriamente a resistência representativa das perdas no núcleo e a reatância de magnetização como função da frequência que funções polinomiais;

Uma técnica para estimação dos parâmetros série do transformador foi apresentada, a qual permite determinar esses parâmetros no ponto de operação em que o transformador está operando. A vantagem da técnica é que os parâmetros série foram determinados mediante, apenas, o ensaio de circuito aberto.

Os resultados experimentais e matemáticos apresentados, neste trabalho, evidenciam que os estudos desenvolvidos contribuem para aprimoramento de modelos matemáticos e modelos de circuitos equivalentes em transformadores monofásicos de baixa potência.

TRABALHOS FUTUROS

Com os objetivos da dissertação atingidos, novos estudos podem ser desenvolvidos com o intuito de dar continuidade à pesquisa, uma vez que diversas variáveis ou características da excitação, na prática, podem ser não senoidais.

Desta forma, as atividades de pesquisas analisando-se excitação não senoidais, respostas em frequência do transformador para diferentes pontos de operação e modelagem matemática de respostas em frequência de grandezas e parâmetros do equipamento continuarão. Assim, sugerem-se como trabalhos futuros os seguintes temas:

- Avaliar a resposta em frequência da corrente de excitação utilizando excitação não puramente senoidal, verificando o comportamento das respostas dos transformadores;
- Avaliar as respostas do transformador para diferentes pontos de operação, de modo a analisar a curva de tensão de alimentação versus corrente de excitação para diferentes frequências;
- Realizar a modelagem matemática das curvas de tensão de alimentação versus corrente de excitação para diferentes frequências de excitação, fazendo comparações de resultados tanto em conjunto como individualmente;
- Avaliar e comparar o comportamento das respostas em frequência das diferenças de fase entre tensão de alimentação e corrente de excitação de transformadores monofásicos de baixa potência com núcleo a base de liga amorfa e ferro-silício com potências nominais diferentes das utilizadas neste trabalho.
- Realizar a modelagem matemática das respostas em frequência das permeabilidades magnéticas de transformadores a base de liga amorfa e ferro-silício, assim como avaliar e comparar suas respectivas respostas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5380-Transformadores de potência. Método de Ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ABU-SIADA, A.; ISLAM, S. *High frequency transformer computer modeling*. IEEE Power Engineering Conference, p. 1 - 5, 2007.

AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. 2. ed. rev. e ampl. – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.

AL-HAJ, A. H.; EL-AMIN, I. *Factors that influence transformer no-load current harmonics*. IEEE Transactions on Power Delivery, p. 163 - 166, 2000.

ARAÚJO, J. F.; LIRA, G. R. S.; FERREIRA, T. V. *Comparação de Técnicas de Estimação de Harmônicos em Sistemas de Potência*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia, 2012.

ASENSI, R.; COBOS, J. A.; GARCÍA, O.; PRIETO, R.; UCEDA, J. *A full procedure to model high frequency transformer windings*. IEEE Power Electronics Specialists Conference, p. 856 - 863, 1994.

ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer-Controlled Systems*. A Division of Simon & Shuster-Englewood Cliffs, 1990.

BATISTA, T. C., LIRA, J. G. A., FREIRE, R. C. S., LUCIANO, B. A., GUERRA, F. C. F., CUCATU, R. *Sistema Automático para Ensaio de Perdas em Núcleos de Transformadores Monofásicos*. IEEE International Conference on Industry Applications, 2010.

BELL, S. C.; BODGER, P. S. *Power transformer design using magnetic circuit theory and finite element analysis — A comparison of techniques*. IEEE Power Engineering Conference, p. 1 - 6, 2007.

CAMERON, A. C.; WINDMEIJER, F. A. G. *An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models*. Journal of Econometrics, 1997.

CATALIOTTI, A., CARA, D. D., FRANCO, P. A., EMANUEL, A. E., NUCCIO, S. *Frequency response of Measurement Current Transformers*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, p. 1254 - 1258, 2008.

CHOWDHURY, A. H.; GRADY, W. M.; FUCHS, E. F. *An investigation of the harmonic characteristics of transformer excitation current under nonsinusoidal supply voltage*. IEEE Power, Energy, & Industry Applications, v. 14, p. 450-458, 1999.

DUFFY, M. C.; HURLEY, W. G. *High frequency effects in planar magnetics: inclusive of skin effect*. IEEE Power Electronics Specialists Conference, p. 645 - 650, 1995.

FALCONE, A. G. *Eletromecânica: transformadores e transdutores, conversão eletromecânica de energia, máquinas elétricas*. São Paulo:Edgar Blücher, 1979.

FERNANDES JR, D. F. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Elétricos Magnéticos*. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado). Campina Grande. 2003.

HURLEY, W. G. *Optimizing core and winding design in high frequency transformers*. IEEE Power Electronics Congress, p. 2 - 13, 1996.

HURLEY, W. G.; WILCOX, D. J.; MCNAMARA, P. S. *Calculation of short circuit impedance and leakage impedance in transformer windings*. IEEE Power Electronics Specialists Conference, p. 651 - 658, 1991.

HURLEY, W. G.; WOLFLE, W. H.; BRESLIN, J. G. *Optimized transformer design: inclusive of high-frequency effects*. IEEE Power Electronics, p. 651 - 659, 1998.

ISLAM, S. M.; COATES, K. M.; LEDWICH, G. *Identification of high frequency transformer equivalent circuit using Matlab from frequency domain data*. IEEE Power, Energy, & Industry Applications, v. 1, p. 357-364, 1997.

JIN, E. S., LIU, L. L., BO, Z., Q., KLIMEK, A. *Parameter identification of the transformer winding based on least-squares method*. IEEE Power and Energy Society General Meeting, p. 1 - 6, 2008.

KEYHANI, A.; MIRI, S.; HAO, S. *Parameter Estimation for Power Transformer Models from Time-Domain Data*. IEEE Computing & Processing, Power, Energy, & Industry Applications, p. 140 - 146, 1986.

LUCIANO, B. A. *Estudo de Aplicações da Liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ Amorfa em Núcleos de Transformadores de Baixa Potência*. Universidade Federal de Campina Grande, (Tese de Doutorado). Campina Grande. 1995.

LUCIANO, B. A. *Fundamentos de Circuitos Magnéticos e Transformadores*. Universidade Federal de Campina Grande, (Apostila da Disciplina Conversão Eletromecânica). Campina Grande, 2010.

LUCIANO, B. A., BATISTA, T. C., FREIRE, R. C. S., CASTRO, W. B., CAMACHO, M. A. G. *Medições de Perdas e da Corrente de Excitação em Transformadores*

Monofásicos de Baixa Potência com Núcleo de Liga Amorfa: Antes e Depois do Processo de Oxidação. VIII SEMETRO, 2009.

MEISTER, D.; OLIVEIRA, M. A. G. *The use of Least Squares Method to estimate the model parameters of a transformer.* IEEE Electrical Power Quality and Utilization, p. 1-6, 2009.

OLIVARES-GALVAN, J. C.; GEORGILAKIS, P. S.; THEOCHARIS, A. D. *Experimental investigation of parameters influencing transformer excitation current.* IEEE Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, p. 1-6, 2010.

PETKOV, R. *Design issues of the high-power high-frequency transformer.* IEEE Power Electronics and Drive Systems, p. 401 - 410, 1995.

PIENIZ, M. *Análise da Influência da Frequência de Comutação e da Ondulação de Entrada no Projeto de Conversores PFC para Minimização do Volume de Magnéticos.* Universidade Federal de Santa Maria, (Dissertação de Mestrado), Santa Maria. 2006.

RICKLEY, A. L.; CLARK, R. E.; POVEY, E. F. *Field Measurements of Transformer Excitation Current as a Diagnostic Tool.* IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981. 1985-1988.

ROBERT, R. *Efeito Pelicular.* Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 22, p. 285 - 289, 2000.

RODRIGUES, M. C. B.; TEIXEIRA, E. C.; BRAGA, H. A. C. *Uma Visão Topológica sobre Sistemas Fotovoltaicos Monofásicos Conectados à Rede de Energia Elétrica.* Núcleo de Automação e Eletrônica de Potência, 2003.

ROSHEN, W. *Ferrite core loss for power magnetic components design.* IEEE Transactions on Magnetics, v. 27, p. 4407 - 4415, 1991.

SAID, D. M.; NOR, K. M. *Effects of harmonics on distribution transformers.* IEEE Power Engineering Conference, p. 1 - 5, 2008.

SLEMON, G. R. *Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas.* São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1974.

THOTTUVELIL, V. J.; WILSON, T. G.; OWEN, H. A. . J. *High-frequency measurement techniques for magnetic cores.* IEEE Transactions on Power Electronics, p. 41 - 53, 1990.

WANG, S., LEE, F. C., ODENDAAL, W. G. *Single layer iron core inductor model and its effect on boost PFC EMI noise.* IEEE Power Electronics Specialist Conference, p. 847-852, 2003.