

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO DO MODELO DE TRANSFORMADORES  
EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA**

Por  
Alexandre de Castro Moleta

Orientador:  
Prof.Dr. Marco Aurélio de Oliveira

Brasília/DF, Julho de 2008

## AGRADECIMENTOS

*Durante o período acadêmico temos uma clara fase de transição em nossas vidas, período este em que passamos por momentos bons e ruins. No entanto, durante todos esses momentos sabemos quem está nos apoiando e acreditando em nosso potencial.*

*Agradeço em primeiro lugar à minha família, por acreditar em mim e me dar todo tipo de suporte de maneira incondicional.*

*Aos meus pais, Wilson e Harriete, pelos ensinamentos de vida em todos os momentos.*

*Aos meus avós, Celso, Alice, Tranqüilo e Aracy pelo apoio durante toda minha vida.*

*À minha irmã Renata, mesmo estando distante fisicamente, esteve sempre dando o suporte necessário.*

*Aos meus tios e primos por proporcionarem oportunidades de felicidade e que com certeza fizeram este momento possível.*

*Ao professor orientador Dr. Marco Aurélio, por seus ensinamentos, conhecimentos técnicos, paciência e extrema dedicação.*

*Ao sábio engenheiro David Meister, pessoa responsável pela motivação e inspiração desta monografia.*

*A todos que de alguma forma tornaram este momento possível.*

## **RESUMO**

### **AVALIAÇÃO DO MODELO DE TRANSFORMADORES EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA**

Em razão da crescente demanda de uma qualidade ótima de energia elétrica, se faz necessário um estudo detalhado a respeito do ciclo de vida dessa energia, começando da geração desta até seu consumo. Dentro desse tema de qualidade de energia elétrica (QEE), os componentes não lineares da rede têm papel fundamental na influência de harmônicas e problemas associados à estas.

O transformador desempenha um papel fundamental nesse cenário e é um dos principais componentes afetados visto sua ampla utilização na rede. O aprimoramento do modelo atual do transformador, que se baseia primordialmente na frequência de operação nominal da rede (60Hz), é um fato que deve ser levado em conta em vista dos benefícios por este trazidos.

A presente monografia consiste basicamente em avaliar a possibilidade de generalização de um modelo eficaz criado por Meister (2006) para um transformador em especial. Também é realizada uma comparação com o modelo convencional utilizado atualmente, de modo a se provar que este modelo não é eficaz quando se trata de redes com harmônicas.

Para a confecção deste trabalho, foi necessária a aquisição de dois transformadores de 1 e de 3 kVA e a utilização de uma fonte harmônica localizada em um dos laboratórios do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB. Os ensaios foram realizados de modo a seguir fielmente os métodos propostos por Meister (2006) em sua dissertação.

A partir das análises feitas com os dados obtidos, foi possível chegar a algumas conclusões primordiais face à proposta desta monografia. A principal delas é que o modelo polinomial em função somente da frequência não é adequado para outros transformadores de características próximas. No caso, o modelo polinomial em função

somente da frequência é extremamente eficaz para o transformador de 5 kVA, no qual foi baseado, no entanto para os transformadores de 1 e 3 kVA da mesma série, feitos com a mesma tecnologia, esse modelo não é aplicável.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES .....</b>	<b>xii</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Introdução.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Os Transformadores inseridos no tema QEE .....</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Transformadores: Conceitos básicos e ensaios .....</b>	<b>4</b>
<b>2.4 Contextualização da Obra de Meister (2006): método e resultados .....</b>	<b>10</b>
<b>2.5 Conclusões .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Material e Métodos .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Introdução .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Laboratório de Qualidade de energia elétrica .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3 Transformadores ensaiados .....</b>	<b>13</b>
<b>3.4 Procedimentos Experimentais .....</b>	<b>14</b>
<b>3.5 Método de Comparação e Análise .....</b>	<b>17</b>
3.5.1 Comparação com o modelo “convencional” .....	17
3.5.2 Comparação com os polinômios de Meister (2006) para o transformador de 5 kVA .....	18
<b>3.6 Conclusões .....</b>	<b>19</b>
<b>4. Resultados e Análise .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 Introdução .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2 Ensaio do Transformador de 1 kVA .....</b>	<b>20</b>
4.2.1 Ensaio em curto-circuito .....	20

4.2.2 Ensaio em vazio .....	25
<b>4.3 Ensaio do Transformador de 3 kVA .....</b>	<b>28</b>
4.3.1 Ensaio em curto-circuito .....	29
4.3.2 Ensaio em vazio .....	33
<b>4.4 Comparação com o modelo “convencional” .....</b>	<b>37</b>
<b>4.5 Comparação com os Polinômios de Meister(2006) .....</b>	<b>49</b>
4.5.1 Polinômios e frequência normalizada .....	50
4.5.2 Comparação dos parâmetros dos transformadores de 1 e 3kVA .....	51
<b>4.6 Conclusões .....</b>	<b>72</b>
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>76</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficiente de Steimmetz para alguns materiais.

Tabela 3.1 – Principais características dos transformadores de 1 kVA e de 3 kVA.

Tabela 4.1 – Dados relativos ao ensaio em curto-circuito. Transformador de 1 kVA.

Tabela 4.2 – Dados obtidos do ensaio em vazio. Transformador de 1 kVA.

Tabela 4.3 – Valores Normalizados e parâmetros obtidos. Transformador de 1 kVA.

Tabela 4.4 – Dados relativos ao ensaio em curto-circuito. Transformador de 3 kVA.

Tabela 4.5 – Dados obtidos do ensaio em vazio. Transformador de 3 kVA.

Tabela 4.6 – Valores Normalizados e parâmetros obtidos. Transformador de 3 kVA.

Tabela 4.7 – Tabela comparativa entre os dados experimentais e o modelo convencional para o transformador de 1 kVA.

Tabela 4.8 – Tabela comparativa entre os dados experimentais e o modelo convencional para o transformador de 3 kVA.

Tabela 4.9 – Tabela comparativa entre os dados polinomiais e o modelo convencional para o transformador de 5 kVA.

Tabela 4.10 – Comparativo entre  $R_{eq}$  obtido através de ensaio e  $R_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1kVA.

Tabela 4.11 – Comparativo entre  $R_{eq}$  obtido através de ensaio e  $R_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3kVA.

Tabela 4.12 – Comparativo entre  $X_{eq}$  obtido através de ensaio e  $X_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1 kVA.

Tabela 4.13 – Comparativo entre  $X_{eq}$  obtido através de ensaio e  $X_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3 kVA.

Tabela 4.14 – Comparativo entre  $R_h$  obtido através de ensaio e  $R_h(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1 kVA.

Tabela 4.15 – Comparativo entre  $R_h$  obtido através de ensaio e  $R_h(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3 kVA.

Tabela 4.16 – Comparativo entre  $X_m$  obtido através de ensaio e  $X_m(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1 kVA.

Tabela 4.17 – Comparativo entre  $X_m$  obtido através de ensaio e  $X_m(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3 kVA.

Tabela 4.18 – Erros associados aos parâmetros de modelagem nas frequências harmônicas. Transformador de 1 kVA.

Tabela 4.19 – Erros associados aos parâmetros de modelagem nas frequências harmônicas. Transformador de 3 kVA.

Tabela 4.20 – Tabela da média e desvio padrão dos erros ao longo do espectro de amostras para o transformador de 1kVA.

Tabela 4.21 – Tabela da média e desvio padrão dos erros ao longo do espectro de amostras para o transformador de 3 kVA.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de um transformador ideal.

Figura 2.2 – Curva  $\Phi \times I_0$  para um núcleo deltamax (50% Fe e 50% Ni).

Figura 2.3 – Circuito equivalente de um transformador monofásico.

Figura 2.4 – Correntes de Foucault induzidas em um núcleo magnético.

Figura 3.1 – Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica.

Figura 3.2 – Transformador de 1kVA.

Figura 3.3 – Transformador de 3kVA.

Figura 3.4 - Circuito esquemático de ensaio em curto-circuito.

Figura 3.5 – Circuito esquemático de ensaio em vazio.

Figura 4.1 – Parâmetro  $R_{eq}$  (%) relativo à perda Joule do transformador de 1 kVA.

Figura 4.2 – Potência de curto-circuito em função da frequência para o transformador de 1 kVA.

Figura 4.3 – Parâmetro  $X_{eq}$  (%) relativo ao fluxo de dispersão dos enrolamentos do transformador de 1 kVA.

Figura 4.4 – Indutância  $L_{eq}$  do transformador de 1 kVA.

Figura 4.5 – Parâmetro  $Z_{eq}$  relativo à impedância equivalente dos enrolamentos do transformador de 1 kVA.

Figura 4.6 – Parâmetro  $R_h$  relativo às perdas no núcleo do transformador de 1 kVA.

Figura 4.7 – Parâmetro  $X_m$  relativo ao fluxo de magnetização do núcleo do transformador de 1 kVA.

Figura 4.8 – Parâmetro  $Z_m$  relativo à impedância modelada do núcleo do transformador de 1 kVA.

Figura 4.9 – Parâmetro  $R_{eq}$  (%) relativo à perda Joule do transformador de 3 kVA.

Figura 4.10 – Potência de curto-circuito em função da frequência para o transformador de 3 kVA.

Figura 4.11 – Parâmetro  $X_{eq}$  (%) relativo ao fluxo de dispersão nos enrolamentos do transformador de 3 kVA.

Figura 4.12 – Indutância  $L_{eq}$  do transformador de 3 kVA.

Figura 4.13 – Parâmetro  $Z_{eq}$  relativo à impedância equivalente dos enrolamentos do transformador de 3 kVA.

Figura 4.14 – Parâmetro  $R_h$  relativo às perdas no núcleo do transformador de 3 kVA.

Figura 4.15 – Parâmetro  $X_m$  relativo ao fluxo de magnetização do núcleo do transformador de 3 kVA.

Figura 4.16 – Parâmetro  $Z_m$  relativo à impedância modelada do núcleo do transformador de 3 kVA.

Figura 4.17 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_{eq}$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

Figura 4.18 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_{eq}$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

Figura 4.19 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_h$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

Figura 4.20 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_m$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

Figura 4.21 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_{eq}$  obtidos para o transformador de 3 kVA.

Figura 4.22 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_{eq}$  obtidos para o transformador de 3 kVA.

Figura 4.23 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_h$  obtidos para o transformador de 3 kVA.

Figura 4.24 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_m$  obtidos para o transformador de 3 kVA.

Figura 4.25 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_{eq}$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

Figura 4.26 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_{eq}$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

Figura 4.27 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_h$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

Figura 4.28 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_m$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

Figura 4.29 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $R_{eq}$  obtido em ensaio e  $R_{eq}(f)$  obtido através de polinômio.

Figura 4.30 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_{eq}$  e  $R_{eq}(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

Figura 4.31 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_{eq}$  e  $R_{eq}(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.

Figura 4.32 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $X_{eq}$  obtido em ensaio e  $X_{eq}(f)$  através de polinômio.

Figura 4.33 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_{eq}$  e  $X_{eq}(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

Figura 4.34 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_{eq}$  e  $X_{eq}(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.

Figura 4.35 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $R_h$  obtido em ensaio e  $R_h(f)$  através de polinômio.

Figura 4.36 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_h$  e  $R_h(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

Figura 4.37 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_h$  e  $R_h(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.

Figura 4.38 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $X_m$  obtido em ensaio e  $X_m(f)$  através de polinômio.

Figura 4.39 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_m$  e  $X_m(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

Figura 4.40 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_m$  e  $X_m(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.

Figura 4.41 – Gráfico de barras associado aos erros dos parâmetros que modelam o transformador de 1 kVA.

Figura 4.42 – Gráfico de barras associado aos erros dos parâmetros que modelam o transformador de 3 kVA.

# LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$a$  - razão de espiras de um transformador.

$\alpha_1$  - temperatura de referência em °C.

$\alpha_2$  - temperatura do meio circundante em °C.

$B$  - indução magnética no núcleo de um transformador.

$d$  - espessura da chapa do núcleo de um transformador.

$\sigma$  - desvio padrão.

$e_1$  - tensão induzida no primário do transformador.

$e_2$  - tensão induzida no secundário do transformador.

$\varepsilon_{\%}$  - erro percentual.

$f$  - frequência .

FP- fator de potência.

$i_1$  - corrente que circula no primário do transformador.

$i_2$  - corrente que circula no secundário do transformador.

$I_0$  - corrente de magnetização do núcleo do transformador.

$I_{CA}$  - corrente de circuito aberto.

$I_{cc}$  - corrente de curto-circuito.

$I_p$  - parcela ativa da corrente de magnetização do núcleo do transformador.

$I_q$  - parcela reativa da corrente de magnetização do núcleo do transformador.

$I_n$  - corrente nominal do transformador.

$I_1$  - Corrente de curto que flui no primário.

$i_h$  - parcela ativa da corrente em vazio de um transformador.

$i_m$  - parcela reativa da corrente em vazio de um transformador.

$\Phi$  - fluxo magnético.

$k$  - inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura.

$K_s$  - coeficiente de Steimmetz.

$\bar{K}$  - média aritmética.

$N_1$  - número de espiras do primário de um transformador.

$N_2$  - número de espiras do secundário de um transformador.

$P_{cc}$  - potência obtida no ensaio em curto-circuito.

$P_{CA}$  - potência obtida no ensaio em vazio.

$R_h$  - resistência associada a modelagem de perdas no núcleo de um transformador.

$R_h(f)$  - resistência associada a modelagem de perdas no núcleo de um transformador obtida através de polinômio referente.

$R_{eq}$  - resistência associada a modelagem de perdas nos enrolamentos de um transformador.

$R_{eq}(f)$  - resistência associada a modelagem de perdas nos enrolamentos de um transformador obtida através de polinômio referente.

$R_\theta$  - resistência corrigida para uma determinada temperatura  $\theta$ .

$S_n$  - potência nominal de um transformador.

$v_1$  - tensão resultante no primário de um transformador.

$v_2$  - tensão resultante no secundário de um transformador.

$V_{CA}$  - tensão de circuito aberto.

$V_{cc}$  - tensão de curto-circuito.

$V_n$  - tensão nominal de um transformador.

$V_{ref}$  - tensão de referência.

$X_m$  - reatância associada a modelagem da magnetização do núcleo de um transformador.

$X_m(f)$  - reatância associada a modelagem da magnetização do núcleo de um transformador obtida por polinômio referente.

$X_{eq}$  - reatância associada a modelagem da dispersão nos enrolamentos de um transformador.

$X_{eq}(f)$  - reatância associada a modelagem da dispersão nos enrolamentos de um transformador obtida por polinômio referente.

$Z_m$  - impedância equivalente do núcleo de um transformador.

$Z_{eq}$  - impedância equivalente dos enrolamentos de um transformador.

# 1. Introdução

A criação de modelos que representam fenômenos físicos é uma prática comum nas áreas de engenharia e física. Com o passar do tempo, pesquisas e inovações tecnológicas provindas destas tendem a melhorar os modelos utilizados. Em um ambiente onde se colocam metas como eficiência e qualidade associadas com baixo custo, se faz totalmente necessária uma evolução nos modelos de modo a suprir novas necessidades.

O transformador é um importante elemento da rede elétrica. Esse equipamento está presente em todas as etapas associadas à energia elétrica. No caso desta monografia, o tema principal abordado será a avaliação da possibilidade de generalização do modelo proposto por Meister (2006) para um transformador monofásico de 5 kVA facilmente encontrado no comércio. A motivação desta monografia é que a partir do momento que se tem um modelo mais preciso de um determinado componente pertencente a um sistema, os benefícios são vários, desde uma melhor estimativa da vida útil do elemento até uma influência mais precisa deste elemento sobre outros componentes desse mesmo sistema.

O conceito de QEE atualmente engloba questões que vão desde a qualidade do atendimento até a qualidade no fornecimento, obviamente não se restringe somente a tensão fornecida na tomada. Transformadores pequenos são amplamente utilizados no mercado brasileiro. Sendo estes em residências ou em soluções de engenharia focadas em pequena escala. Portanto, a possibilidade de evolução do atual modelo é bastante atrativa e deve ser levada em conta em vista dos benefícios por ela trazidos.

Logo, esta monografia avaliará transformadores de diferentes potências quando comparados ao transformador utilizado por Meister (2006), no entanto pertencentes à mesma classe. Entende-se por classe neste trabalho a mesma tecnologia de fabricação e a facilidade com que o objeto em questão é encontrado no mercado. A monografia é organizada da seguinte forma:

O segundo capítulo aborda tópicos considerados essenciais ao entendimento deste trabalho. A segunda seção deste capítulo aborda conceitos relacionados ao tema QEE. A terceira seção aborda conceitos relacionados ao funcionamento de transformadores e os ensaios utilizados para a criação de seu circuito equivalente. E por último a quarta seção aborda e contextualiza os resultados obtidos por Meister em sua dissertação.

O terceiro capítulo aborda os materiais e métodos necessários para a confecção desta monografia. A segunda e a terceira seções abordam as instalações utilizadas e os transformadores que foram ensaiados. A quarta seção trata dos métodos de ensaios utilizados nesta monografia. A quinta seção aborda os métodos de comparação e análise dos dados obtidos através dos ensaios. Acrescenta-se aqui que nesta monografia é feita uma comparação com o modelo convencional, ou seja, o mais utilizado atualmente.

O quarto capítulo diz respeito aos dados experimentais, discussões e análise. As duas seções iniciais mostram o cálculo do circuito equivalente dos transformadores em função dos ensaios realizados. A seção posterior compreende a comparação com o modelo convencional. A quarta seção é composta basicamente pela comparação dos dados obtidos experimentalmente com os dados obtidos pelo modelo de Meister (2006).

O quinto capítulo engloba as conclusões a respeito de todo o estudo desenvolvido nesta monografia e sugere possibilidades de estudos a respeito deste tema.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Introdução**

O presente capítulo tem a finalidade de sintetizar os principais conceitos utilizados nesta monografia de maneira a facilitar o entendimento desta. Desse modo, o restante deste capítulo está dividido em três sub-capítulos, de maneira a melhor situar os fundamentos teóricos e suas aplicações nessa dissertação.

A primeira seção aborda a questão do transformador no tema Qualidade de Energia Elétrica (QEE), vislumbrando a influência das características harmônicas do transformador na rede e as influências que este sofre. Essa primeira seção visa situar a importância do transformador na rede. A segunda seção faz uma revisão básica de transformadores, objetos desta dissertação, revisando conceitos tais como: corrente de magnetização, ensaio em curto-circuito e ensaio à vazio. Essa seção é de grande importância, pois a metodologia empregada no trabalho tem sua base na referida teoria. A terceira seção visa contextualizar a obra de *Meister (2006)* e mostrar seus resultados, que serão utilizados neste trabalho.

### **2.2. Os Transformadores inseridos no tema QEE**

Em um sistema trifásico de corrente alternada espera-se que as fases sejam equilibradas e simétricas, no entanto, com a inserção de elementos não-lineares, o sistema deixa de ser ideal. O crescimento da rede elétrica traz consigo, naturalmente, um aumento no nível de complexidade desta. Dois tipos de fatores trazem problemas à rede: internos e externos. Os fatores internos são aqueles que fazem parte da constituição natural do sistema, tais como a falta de linearidade em transformadores quando operados em condições não ideais. Os fatores externos podem ser surtos de tensão, surtos de corrente causados por intempéries naturais, por exemplo. No entanto, grande parte das distorções harmônicas que circulam na rede provém de cargas não lineares, como equipamentos que se utilizem de chaveamentos, computadores construídos com tecnologia de estado sólido e transformadores.



O conceito de QEE está relacionado a qualquer alteração que possa ocorrer na magnitude, forma de onda e frequência na transmissão de corrente ou tensão. É conveniente inserir no conceito de QEE as interrupções de transmissão que eventualmente geram tensões e correntes transitórias na rede. As harmônicas distorcem as formas de onda senoidais acarretando sérios problemas para a rede. Alguns desses problemas são expostos a seguir:

- Aumento de sobretensão e sobrecorrente, acarretando em funcionamentos indevidos dos equipamentos. Assim sendo, reduzem sua vida útil.
- A solicitação dos isolamentos se torna maior, reduzindo assim seu tempo de vida útil e seu nível de proteção. Potencializam uma maior probabilidade de ocorrer acidentes.
- O aumento do consumo de energia elétrica e um maior gasto com possíveis manutenções e reposição de equipamentos.

Faz-se completamente necessário um estudo de transformadores dentro do tema QEE visto que o transformador é um elemento presente em praticamente todas as etapas do sistema de energia elétrica. Encontram-se na rede transformadores de vários portes, variando de frações de kVA até dezenas de MVA e essa variação também existe na parte econômica da construção e manutenção destes. Seguindo essa linha de pensamento, o escopo desta dissertação é tratar das influências que a inserção de harmônicas na rede tem sobre os transformadores monofásicos de baixa potência, visto que são transformadores largamente utilizados no mercado, com uma grande variedade de fabricantes cumprindo assim um papel importante no sistema.

### **2.3 Transformadores: Conceitos básicos e ensaios**

O transformador desempenha um importante papel na transmissão de potência elétrica. Afinal, abaixa ou aumenta tensões/correntes com um determinado rendimento. Os transformadores são feitos em geral de dois enrolamentos: primário e secundário, acoplados através de um núcleo ferromagnético. Pode-se visualizar isto na Figura 2.1 .

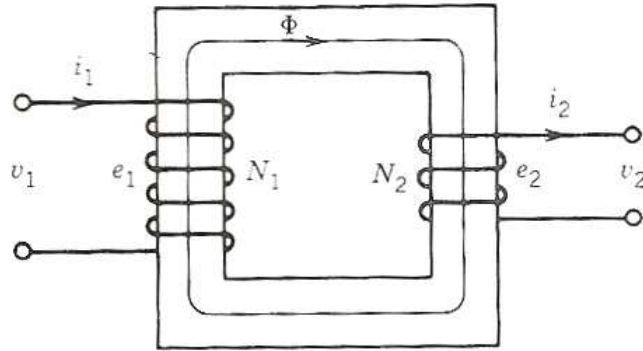


Figura 2.1 – Representação de um transformador ideal.

Fonte: (Sen , 1997) com modificações.

Ao se colocar uma fonte de tensão alternada  $v_1$  no lado primário do transformador, onde tem o enrolamento  $N_1$ , é induzida uma tensão  $e_1$  nos enrolamentos e assim, segundo a lei de Faraday, é gerado um fluxo  $\Phi$  que circula no núcleo ferromagnético. O fluxo  $\Phi$  acopla o segundo enrolamento  $N_2$  e induz uma tensão  $e_2$  no enrolamento secundário, assim disponibilizando uma tensão  $v_2$  nesse terminal. Deste fato temos as seguintes relações:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1} = a \quad (\text{Equação 2.1})$$

Quando uma carga é colocada no lado secundário do transformador, esta drena uma corrente  $i_2$  que fará com que o primário contra-balanceie este novo fluxo gerado, que se opõe ao fluxo  $\Phi$  drenando uma corrente  $i_1$  da fonte. A relação entre correntes de primário e secundário estão na equação 2.1.

Como visto anteriormente o núcleo é um material ferro-magnético, sendo este tipo de material dotado de propriedades não-lineares, tais como histerese magnética e saturação. Assim sendo, o transformador pode ser visto como um dispositivo não linear. A histerese magnética consiste em um processo onde podem haver dois níveis de fluxo  $\Phi$  para um valor de corrente de magnetização  $I_0$ . O valor do fluxo depende da situação

anterior do núcleo. Tal fato pode ser visualizado na Figura 2.2. O processo de saturação consiste em um determinado estado do núcleo de modo que mesmo aumentando a corrente  $I_0$ , o fluxo permanecerá praticamente constante. A saturação pode ser percebida na Figura 2.2. A partir de um ponto  $I_{0MÁX}$ , o aumento de corrente não acarreta em aumentos significativos de  $\Phi$ .

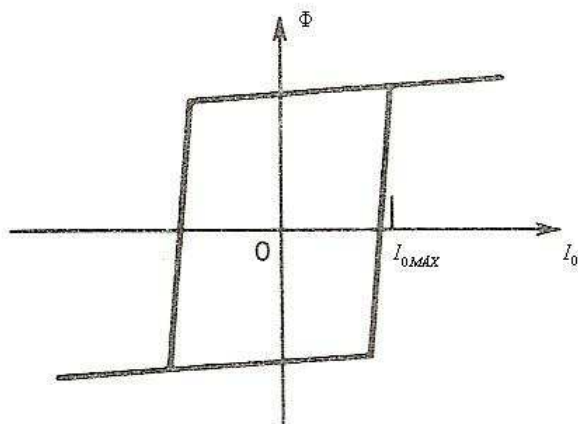


Figura 2.2 – Curva  $\Phi \times I_0$  para um núcleo deltamax (50% Fe e 50% Ni).

Fonte: (Sen , 1997) com modificações.

Durante seu funcionamento, o transformador estabelece um fluxo principal no circuito magnético e também são estabelecidas correntes nos enrolamentos. O transformador real tem efeitos de não linearidade e perdas. Para a aferição de valores relativos a essas não-idealidades utilizam-se dois tipos de ensaio: ensaio em vazio e ensaio em curto-circuito.

O circuito equivalente de um transformador real pode ser visualizado na Figura 2.3. Adota-se nesta monografia o modelo em paralelo dos parâmetros do núcleo. Os parâmetros  $R_h$  e  $X_m$  estão relacionados às perdas e à magnetização do núcleo e serão determinados através do ensaio em vazio. Os parâmetros  $R_{eq}$  e  $X_{eq}$  são associados as perdas e à dispersão relativas aos enrolamentos de cobre e serão determinados por meio

de ensaio em curto-circuito. Cabe aqui a necessidade de ressaltar que neste circuito estão sendo consideradas que as impedâncias e tensões do secundário do transformador são referenciadas ao primário.

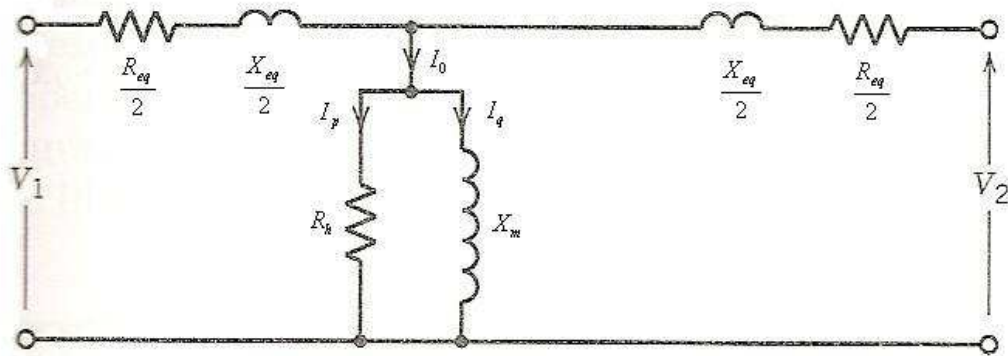


Figura 2.3 – Circuito equivalente de um transformador monofásico.

Fonte: (Sen , 1997) com modificações.

O ensaio em vazio consiste em utilizar uma fonte de tensão no valor nominal do transformador no lado de baixa tensão e deixar o lado de alta tensão aberto. Mede-se, assim, a corrente  $I_0$ , a tensão de entrada  $V_1$  e a potência consumida em aberto  $P_{CA}$ . Por meio desses valores, determinam-se  $R_h$ ,  $X_m$  e conseqüentemente  $Z_m$ , através das seguintes equações:

$$R_h = \frac{V_1}{I_p} \quad (\text{equação 2.2})$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_q} \quad (\text{equação 2.3})$$

$$Z_m = R_h // jX_m \quad (\text{equação 2.4})$$

Onde

$$I_p = \frac{P_{ca}}{V_1} \text{ e } I_q = \sqrt{I_0^2 - I_p^2} \quad (\text{equação 2.5 e 2.6})$$

Neste caso, a corrente  $I_0$  foi decomposta em  $I_p$  e  $I_q$ , suas componentes ativa e reativa, respectivamente.

Essas perdas no núcleo acontecem devido aos processos de histerese e correntes parasitas de Foucault. As perdas por histerese podem ser determinadas pela equação:  $P_h = K_s B^{1,6} f$  (Abreu et al , 1990), onde  $K_s$  é o coeficiente de Steimmetz, exemplificado na Tabela 2.1,  $B$  a indução (valor máximo) no núcleo e  $f$  frequência em Hertz. As correntes parasitas de Foucault podem ser explicadas pela lei de Faraday. Como existe no núcleo um fluxo alternado, neste serão induzidas forças eletromotrizes que por sua vez farão aparecer correntes. Uma visualização de tal fato é feita na Figura 2.4. As perdas relativas às correntes de Foucault podem ser calculadas através da seguinte expressão:

$$P_f = \frac{2,2 f^2 B^2 d^2}{10^3} \quad (\text{Abreu et al , 1990})$$

onde  $B$  é a indução máxima no núcleo,  $f$  frequência em Hertz e  $d$  é a espessura da chapa em milímetros. Esse efeito pode ser minimizado pela substituição de um núcleo maciço por um núcleo composto por lâminas eletricamente isoladas entre si.

Tabela 2.1 – Coeficiente de Steimmetz para alguns materiais.

Fonte: (Abreu et al , 1990).

MATERIAL	$K_s$
Ferro doce	2,50
Aço doce	2,70
Aço doce para máquinas	10,00
Aço fundido	15,00
Fundição	17,00
Aço doce 2% de silício	1,50
Aço doce 3% de silício	1,25
Aço doce 4% de silício	1,00
Laminação doce	3,10
Laminação delgada	3,80
Laminação ordinária	4,20

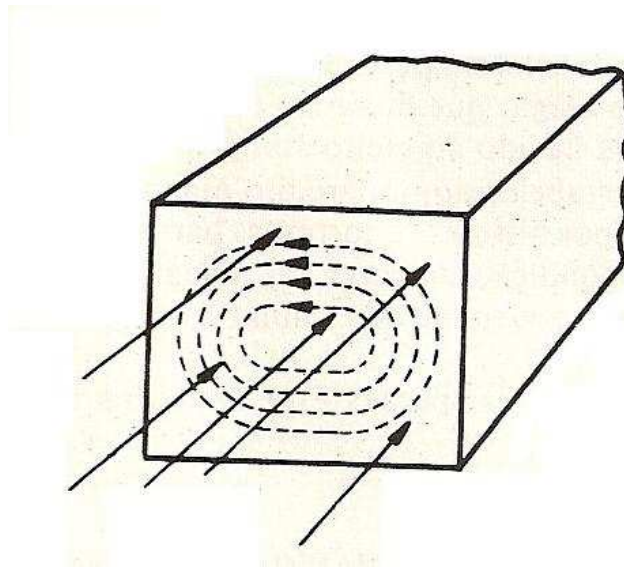


Figura 2.4 – Correntes de Foucault induzidas em um núcleo magnético.

Fonte: (Abreu et al, 1990).

O ensaio em curto-circuito consiste em colocar uma fonte de tensão no lado de alta do transformador e colocar em curto-circuito o lado de baixa. A justificativa para se utilizar a fonte no lado de alta é que muitas vezes a fonte não consegue suprir a corrente nominal demandada pelo lado de baixa. Este ensaio é feito utilizando-se a corrente nominal, visto que devido ao curto-circuito a tensão de entrada será da ordem de 10% da nominal.

Sendo a tensão de entrada 10% da nominal (Abreu et al, 1990), as perdas no núcleo reduzirão consideravelmente e poder-se-á desprezar o ramo magnetizante durante este ensaio. As medidas a serem obtidas serão  $P_{cc}$ ,  $V_{cc}$  e  $I_1$  através das quais calcularemos :

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_1^2} \quad (\text{equação 2.7})$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_1} \quad (\text{equação 2.8})$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (\text{equação 2.9})$$

Esse tipo de ensaio visa principalmente a determinação das perdas nos enrolamentos de cobre, que acontecem devido ao efeito Joule e à determinação da dispersão do fluxo nos enrolamentos de cobre. Frisa-se aqui que essas perdas e dispersões são referentes às perdas durante o funcionamento nominal do transformador.

## **2.4 Contextualização da Obra de Meister (2006): método e resultados**

A obra de Meister “Aplicação do método dos Mínimos Quadrados na estimação de Parâmetros do modelo de um transformador”, 2006 visa desenvolver um modelo matemático em função da frequência mais preciso tendo um baixo custo computacional. Por meio deste modelo mais preciso existiria a possibilidade de se entender melhor os efeitos das imperfeições da rede em transformadores. No caso de sua dissertação, essa modelagem em função da frequência foi feita para um transformador monofásico de 5 kVA.

O método conta com os tradicionais ensaios em curto-circuito e em vazio feitos em uma certa extensão de frequências, de modo a se levantar a resposta em frequência do transformador. Assim sendo, estimou-se os parâmetros do transformador para cada frequência e pelo método dos Mínimos Quadrados foram obtidos polinômios que representam os parâmetros do transformador em função da frequência, de maneira otimizada. Essa otimização foi feita pela minimização do erro residual entre o valor real do parâmetro e as estimativas obtidas com a função de aproximação e da obtenção do menor grau polinomial possível para essas funções. Após a obtenção desses polinômios, para a verificação do princípio da superposição foram feitos novos ensaios sobrepondo a tensão nominal na frequência de 60 Hz a alguns harmônicos. Comparando os dados obtidos com esses novos ensaios e os dados obtidos por intermédio das equações chegou-se a um resultado satisfatório.

Algumas das conclusões obtidas por Meister (2006) para o transformador em questão foram as seguintes: “..os parâmetros associados às perdas Joule, ao fluxo de dispersão e ao fluxo de magnetização são adequadamente representados por funções polinomiais de terceiro grau, ao passo que as perdas no núcleo são bem representadas por funções polinomiais de segundo grau”. Os polinômios obtidos:

$$P_{R.eq}(f_n) = 4,05 + 0,20f_n - 0,12f_n^2 + 0,09f_n^3 \quad (\text{equação 2.10})$$

$$P_{X.eq}(f_n) = 2,68 + 1,25f_n + 0,09f_n^2 - 0,10f_n^3 \quad (\text{equação 2.11})$$

$$P_{Rh}(f_n) = 4,72 + 0,65f_n - 0,39f_n^2 \quad (\text{equação 2.12})$$

$$P_{Xm}(f_n) = 4,27 - 1,43f_n - 0,99f_n^2 + 0,80f_n^3 \quad (\text{equação 2.13})$$

## 2.5 Conclusões

Nesse capítulo foram apresentados os principais pontos teóricos necessários ao entendimento deste trabalho. Com uma crescente inclusão de equipamentos eletrônicos na rede elétrica, se torna bastante importante um estudo dos impactos causados por estes. Como parte integrante da infra-estrutura da rede, o transformador é afetado e deve ser estudado mais a fundo.

O modelo matemático do transformador e seus fenômenos intrínsecos foram apresentados. Os tipos de ensaios foram brevemente explicados e serão abordados mais adequadamente no seguinte capítulo Material e Métodos.

Neste capítulo também se contextualizou a obra de Meister (2006). Assim, seus principais resultados e conclusões foram apresentados.



## 3. Material e Métodos

### 3.1 Introdução

O presente capítulo tem como finalidade a apresentação dos equipamentos envolvidos na monografia e o método que será utilizado no tratamento dos resultados. A segunda seção apresenta o Laboratório de qualidade de energia elétrica, que é o local físico onde os ensaios foram realizados. A terceira seção trata dos transformadores de 1 e 3 kVA que são utilizados. A quarta seção retoma a metodologia de ensaios em curto-circuito e em vazio apresentada na seção 2.3 e aplica ao caso desta dissertação. A quinta seção apresenta como serão feitas as comparações com as equações de Meister (2006).

### 3.2 Laboratório de Qualidade de energia elétrica

O departamento de engenharia elétrica da Universidade de Brasília conta com uma unidade de ensino no âmbito de qualidade de energia elétrica(QEE). O laboratório QEE é localizado no prédio SG-11 e conta com uma área aproximada de 40  $m^2$ . Pode-se visualizar este laboratório na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica.

Alguns equipamentos se encontram disponíveis neste ambiente de pesquisa. Porém o principal equipamento a ser utilizado nesta monografia é a fonte de alimentação da *California Instruments – IX*. Algumas propriedades desta fonte são:

- Possibilidade de geração de energia AC/DC em níveis de grandeza que podem superar 30 kVA;
- Baixa distorção de saída e impedância programável;
- Ampla faixa de frequências, que varia de 16 a 500 Hz;
- Capacidade de medição e geração de ondas harmônicas, sendo estas sobrepostas caso o usuário queira; e
- Interface gráfica através de software em funcionamento na plataforma Windows.

### 3.3 Transformadores ensaiados

Os transformadores utilizados no ensaio são de utilização comum e amplamente encontrado no comércio local. Na Figura 3.2 pode-se visualizar o transformador de 1 kVA e na Figura 3.3 pode-se visualizar o transformador de 3 kVA.



Figura 3.2 – Transformador de 1kVA.



Figura 3.3 – Transformador de 3kVA.

A Tabela 3.1 resume as principais características desses transformadores.

Tabela 3.1 – Principais características dos transformadores de 1 kVA e de 3 kVA.

<b>TRANSFORMADOR</b>	<b>1kVA</b>	<b>3kVA</b>
<b>Marca</b>	TRANCIL	TRANCIL
<b>Modelo</b>	TN-101B	TN-301B
<b>Potência (VA)</b>	1010	3010
<b>Nº de fases</b>	1	1
<b>Corrente no primário (A)</b>	4,59	13,68
<b>Corrente no secundário (A)</b>	9,18	27,36
<b>Tensão no primário (V)</b>	220	220
<b>Tensão no secundário (V)</b>	110	110

### 3.4 Procedimentos Experimentais

Para a determinação dos parâmetros equivalentes dos transformadores, utilizam-se os ensaios em curto-circuito e em vazio, já descritos na seção 2.3. As próximas subseções descrevem como os ensaios são realizados em laboratório

#### 3.4.1 Ensaio em curto circuito

O ensaio em curto-circuito tem como principal finalidade o levantamento dos parâmetros relacionados aos enrolamentos do transformador. O circuito de referência pode ser visualizado na Figura 3.4.

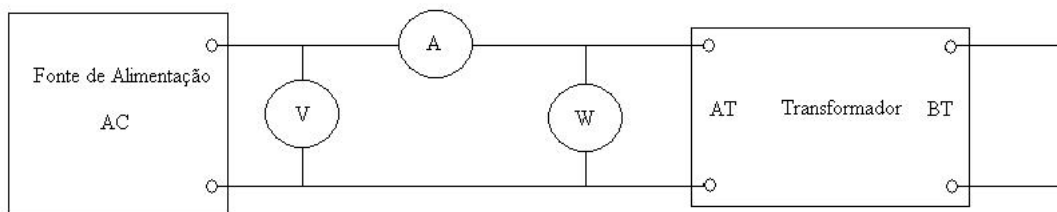


Figura 3.4 – Circuito esquemático de ensaio em curto-circuito.

O ensaio utilizado nessa monografia seguirá o mesmo método utilizado por Meister (2006), que consiste em manter a corrente nominal, variar a frequência de 50 a 300 Hz em passos de 10 Hz e coletar os dados relativos ao lado de alta tensão. A partir da obtenção desses dados, calcula-se os parâmetros dos enrolamentos em p.u. através das seguintes equações:

$$v_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_n} \quad (\text{equação 3.1})$$

$$p_{cc} = \frac{P_{cc}}{S_n} \quad (\text{equação 3.2})$$

$$i_{cc} = \frac{I_{cc}}{I_n} \quad (\text{equação 3.3})$$

$$Z_{eq} = \frac{v_{cc}}{i_{cc}} \quad (\text{equação 3.4})$$

$$R_{eq} = \frac{p_{cc}}{i_{cc}^2} \quad (\text{equação 3.5})$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (\text{equação 3.6})$$

A equação utilizada para correção da resistência em função da temperatura está explicitada logo abaixo:

$$R_{\theta} = R_{eq} \frac{\alpha_2 + k}{\alpha_1 + k} \quad (\text{equação 3.7})$$

Cabe aqui lembrar que o laboratório não dispõe de sensores térmicos adequados para realização de tal correção, mesmo esta sendo recomendada pela norma NBR5380/93.

### 3.4.2 Ensaio em vazio

O ensaio em vazio tem como finalidade o levantamento da impedância relativa ao núcleo do transformador. O circuito de referência pode ser visualizado na Figura 3.5.

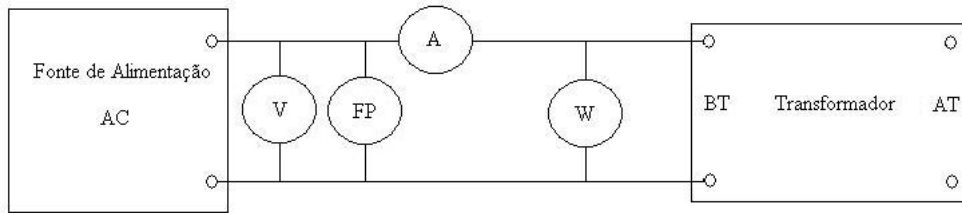


Figura 3.5 – Circuito esquemático de ensaio em vazio.

Este ensaio seguirá o mesmo método utilizado por Meister (2006), o qual consiste em manter a tensão nominal no lado de baixa tensão, variar a frequência de 50 a 300 Hz em passos de 10 Hz e coletar os dados relativos ao lado de baixa tensão, tais como potência, corrente e fator de potência. A partir da obtenção desses dados, calculam-se os parâmetros equivalentes em p.u. através das seguintes equações:

$$v_0 = \frac{V_0}{V_n} \quad (\text{equação 3.8})$$

$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} \quad (\text{equação 3.9})$$

$$p_0 = \frac{P_{ca}}{S_n} \quad (\text{equação 3.10})$$

$$\cos(\theta_0) = \frac{p_0}{v_0 i_0} \quad (\text{equação 3.11})$$

$$i_h = i_0 \cos(\theta_0) \quad (\text{equação 3.12})$$

$$i_m = i_0 \text{sen}(\theta_0) \quad (\text{equação 3.13})$$

$$R_h = \frac{v_0}{i_h} \quad (\text{equação 3.14})$$

$$X_m = \frac{v_0}{i_m} \quad (\text{equação 3.15})$$

### 3.5 Método de Comparação e Análise

As seguintes sub-seções têm como finalidade explicar os métodos que são utilizados nesta monografia.

#### 3.5.1 Comparação com o modelo “convencional”

Entende-se por modelo convencional nessa monografia o procedimento de se obter os parâmetros do transformador na frequência a partir dos ensaios clássicos feitos somente na frequência nominal de funcionamento.

Através dos tradicionais ensaios em curto-circuito e em vazio, feitos somente para a frequência de 60 Hz, obteremos :  $X_{eq}^{60Hz}$ ,  $R_{eq}^{60Hz}$ ,  $X_m^{60Hz}$  e  $R_h^{60Hz}$  para o circuito equivalente representado na Figura 2.3. O procedimento adotado é disposto a seguir.

Para o caso das reatâncias de dispersão dos enrolamentos e do núcleo, tem-se :

$$X_{eq} = 2\pi f L_{eq} \quad (\text{equação 3.16})$$

Considera-se  $L_{eq}$  constante e igual à:

$$L_{eq} = \frac{X_{eq}^{60Hz}}{2\pi f} \quad (\text{equação 3.17})$$

Variando-se a frequência, resulta-se em  $X_{eq}$  para as frequências de 50 a 300 Hz, incrementadas de 10 em 10 Hz. Esse procedimento também é válido para a reatância de dispersão do núcleo do transformador  $X_m$ .

Para o caso dos parâmetros que modelam as perdas nos enrolamentos e no núcleo,  $R_{eq}$  e  $R_h$  respectivamente, o procedimento muda um pouco. No caso do transformador ideal, despreza-se a variação da resistência em função da frequência. No

entanto, nesta monografia essa variação será quantificada. As equações utilizadas para se estimar essa variação são as seguintes:

$$R(h) = R^{60hz} \sqrt{h} = R^{60hz} \sqrt{\frac{f}{60}} \quad (\text{equação 3.18})$$

$$R\left(\frac{h}{2}\right) = R^{60hz} \sqrt{\frac{h}{2}} = R^{60hz} \sqrt{\frac{f}{120}} \quad (\text{equação 3.19})$$

Onde  $h$  é a ordem harmônica dada pela relação da frequência desejada sobre a frequência principal (nominal), no caso 60 Hz. Portanto, a partir dos parâmetros relativos às perdas do transformador obtidos com os ensaios somente em 60 Hz, variando-se a frequência e aplicando as equações 3.18 e 3.19, obtêm-se um modelo em função da frequência.

A partir desses modelos Tabelados para os transformadores, uma comparação entre os dados experimentais dos transformadores de 1 e de 3 kVA e esses modelos serão feitas. Uma comparação também será feita comparando os dados obtidos por meio dos polinômios de Meister (2006) para o transformador de 5 kVA e os modelos acima apresentados.

### 3.5.2 Comparação com os polinômios de Meister (2006) para o transformador de 5 kVA

A comparação com os resultados obtidos por Meister (2006) será feita em três etapas. A primeira consiste de uma comparação quantitativa medindo o erro entre os dados experimentais obtidos em ensaio para os transformadores de 1 e de 3 kVA e os dados obtidos pelos polinômios de Meister (2006). Esse erro é medido através da seguinte equação:

$$\mathcal{E}_{\%} = \left| \frac{K_{\%}^{\text{exp}} - K_{\%}^{(f)}}{K_{\%}^{\text{exp}}} \right| \quad (\text{equação 3.20})$$

Onde K genericamente representa o parâmetro que modela os efeitos do transformador.

A segunda etapa consiste basicamente em analisar os erros relativos às frequências harmônicas empregadas nos ensaios. Essa etapa é fundamental pois permite com relativa facilidade visualizar se existe algum padrão nos erros dos parâmetros. Com um padrão estabelecido, teoricamente seria possível estabelecer um fator de correção geral para esses transformadores.

A terceira etapa consiste em avaliar a média e o desvio padrão dos erros associados a cada parâmetro. A finalidade dessa etapa é ter uma visão qualitativa mais abrangente da situação tratada. Esta etapa define o status da comparação e a possibilidade de generalização do modelo polinomial de Meister. A média e o desvio padrão são colocados a seguir:

$$\bar{K} = \sum_{i=0}^n \frac{K_i}{n} \quad (\text{equação 3.21})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (K_i - \bar{K})^2}{n}} \quad (\text{equação 3.22})$$

### 3.6 Conclusões

Foram apresentados nesse capítulo os materiais a serem utilizados, tais como a fonte harmônica e os tipos de transformador, e o método empregado ao longo dessa dissertação, como os procedimentos de ensaio e posteriormente o método de comparação.



## **4. Resultados e Análise**

### **4.1 Introdução**

O presente capítulo tem como principal finalidade a apresentação dos dados obtidos em laboratório, comparação e análise destes. O capítulo é dividido em quatro seções. A primeira e a segunda são relativas aos dados obtidos e os parâmetros calculados com os transformadores de 1 e de 3 kVA, respectivamente. A terceira seção tem a finalidade de fazer as comparações e respectiva análise dos dados obtidos com as equações do modelo convencional. A quarta seção compara os dados obtidos dos ensaios com os dados obtidos através dos polinômios de Meister (2006) e tem por finalidade analisar erros e inconsistências.

### **4.2 Ensaios do Transformador de 1 kVA**

A seguinte seção tem como finalidade apresentar os dados experimentais e obter os parâmetros do circuito equivalente do transformador de 1 kVA. Divide-se em duas sub-seções: a primeira é relativa ao ensaio em curto-circuito, que visa determinar os parâmetros relativos às perdas e ao fluxo de dispersão nos enrolamentos do transformador. A segunda sub-seção é relativa ao ensaio em vazio e visa a determinação dos parâmetros relativos às perdas e ao fluxo de magnetização do núcleo do transformador.

#### **4.2.1 Ensaio em curto-circuito**

Seguindo o procedimento descrito no item 3.4.1 , realizou-se o ensaio em curto-circuito de modo a determinar os parâmetros  $R_{eq}$  ,  $X_{eq}$  e  $Z_{eq}$  do transformador em questão. Os dados e resultados estão dispostos na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Dados relativos ao ensaio em curto-circuito. Transformador de 1 kVA.

Variáveis medidas				Cálculo da Impedância série		
$f$ (Hz)	$V_{cc}$ (V)	$I_{cc}$ (A)	$P_{cc}$ (kW)	$R_{eq}$ (%)	$X_{eq}$ (%)	$Z_{eq}$ (%)
50	13,47	4,60	0,0618	5,99	0,82	6,05
60	13,55	4,60	0,0613	5,99	1,06	6,08
70	13,55	4,58	0,0613	6,04	0,90	6,11
80	13,74	4,58	0,0617	6,08	1,19	6,20
90	13,84	4,58	0,0617	6,08	1,41	6,24
100	13,93	4,59	0,0627	6,15	1,22	6,27
110	14,02	4,58	0,0627	6,17	1,35	6,32
120	14,1	4,58	0,0630	6,21	1,37	6,36
130	14,28	4,59	0,0640	6,27	1,38	6,42
140	14,36	4,59	0,0633	6,21	1,78	6,46
150	14,5	4,59	0,0643	6,31	1,67	6,52
160	14,62	4,59	0,0643	6,31	1,87	6,58
170	14,75	4,59	0,0646	6,33	1,98	6,64
180	14,76	4,57	0,0636	6,29	2,21	6,67
190	15,03	4,60	0,0648	6,33	2,33	6,75
200	15,11	4,59	0,0648	6,36	2,41	6,80
210	15,24	4,59	0,0651	6,38	2,51	6,86
220	15,38	4,59	0,0660	6,47	2,42	6,92
230	15,53	4,59	0,0653	6,40	2,79	6,99
240	15,52	4,58	0,0653	6,43	2,76	7,00
250	15,7	4,59	0,0655	6,42	2,94	7,06
260	15,92	4,59	0,0664	6,51	2,98	7,16
270	16,05	4,59	0,0666	6,53	3,09	7,22
280	16,19	4,59	0,0666	6,53	3,23	7,28
290	16,26	4,60	0,0660	6,44	3,43	7,30
300	16,36	4,59	0,0660	6,47	3,51	7,36

A resposta em frequência do transformador pode ser visualizada nas Figuras 4.1 e 4.3, as quais representam os parâmetros associados à perda Joule e ao fluxo de dispersão, respectivamente. Para uma melhor visualização da relação entre a modelagem das perdas por meio do parâmetro  $R_{eq}$ , mostra-se na Figura 4.2 o gráfico relativo a potência de curto-circuito em função da frequência.

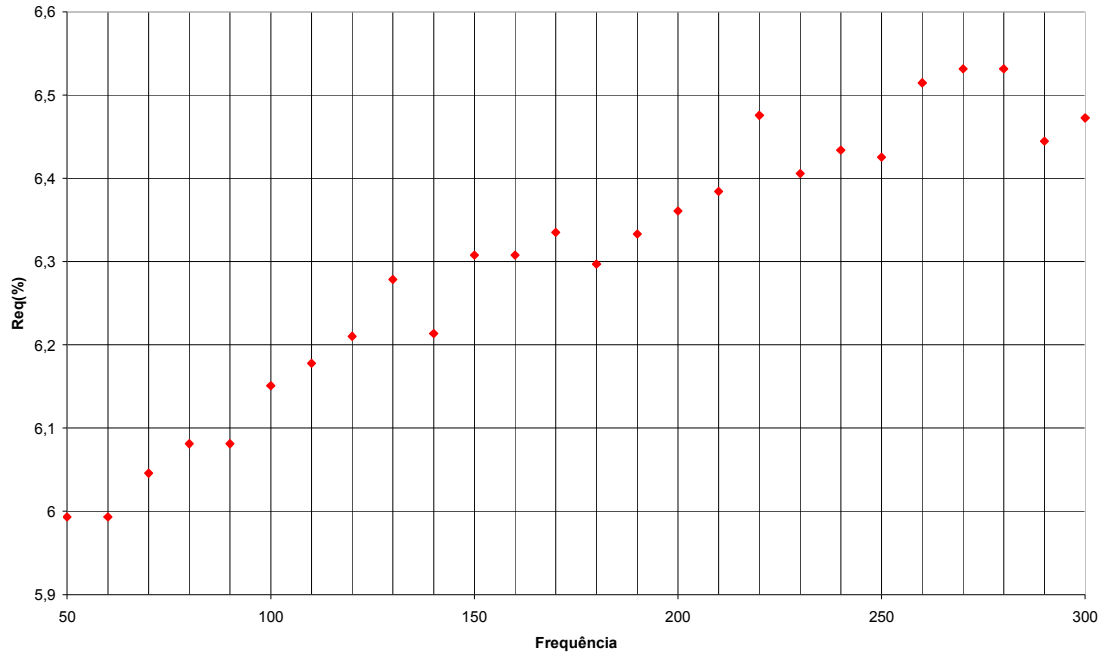


Figura 4.1 – Parâmetro  $R_{eq}$  (%) relativo à perda Joule do transformador de 1 kVA.

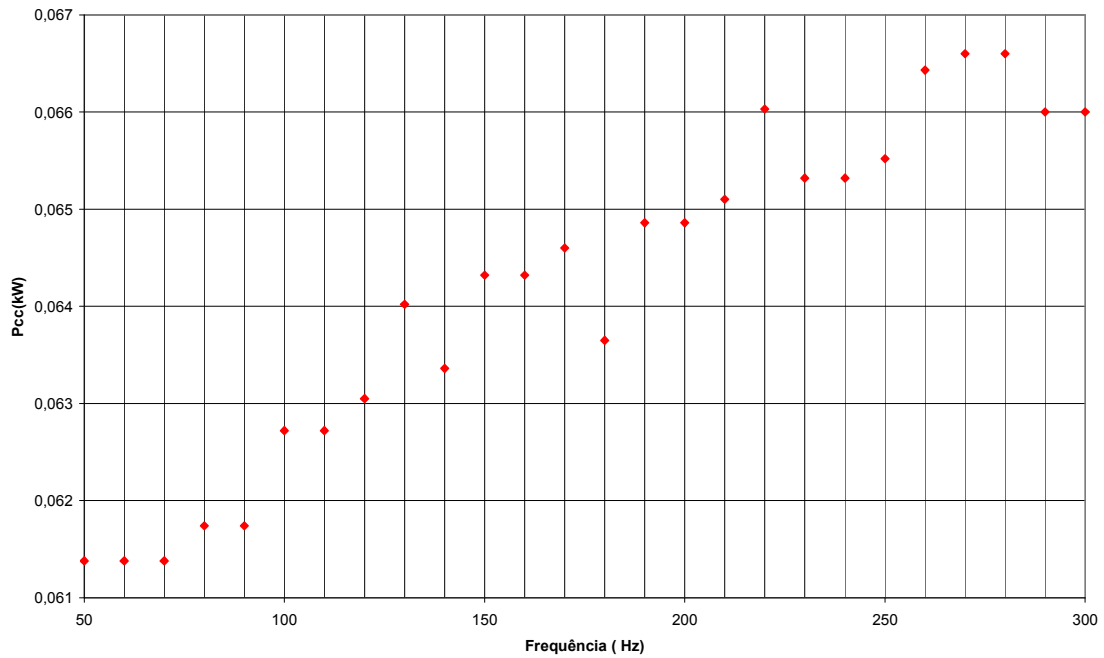


Figura 4.2 – Potência de curto-circuito em função da frequência para o transformador de 1 kVA.

Pela análise da curva disposta na Figura 4.1 percebe-se uma relação proporcional entre a frequência e a perda por efeito Joule, representado aqui como  $R_{eq}$ , no entanto esta não é linear. O parâmetro  $R_{eq}$  varia aproximadamente 8% ao longo deste intervalo de frequências. Na curva de potência de curto-circuito percebemos uma grande semelhança com a curva do parâmetro  $R_{eq}$ . Tal fato já é esperado, visto que durante o ensaio em curto-circuito a resistência equivalente do núcleo se torna muito grande quando comparada a  $R_{eq}$ . Logo, as perdas nos enrolamentos representam fielmente a potência consumida.

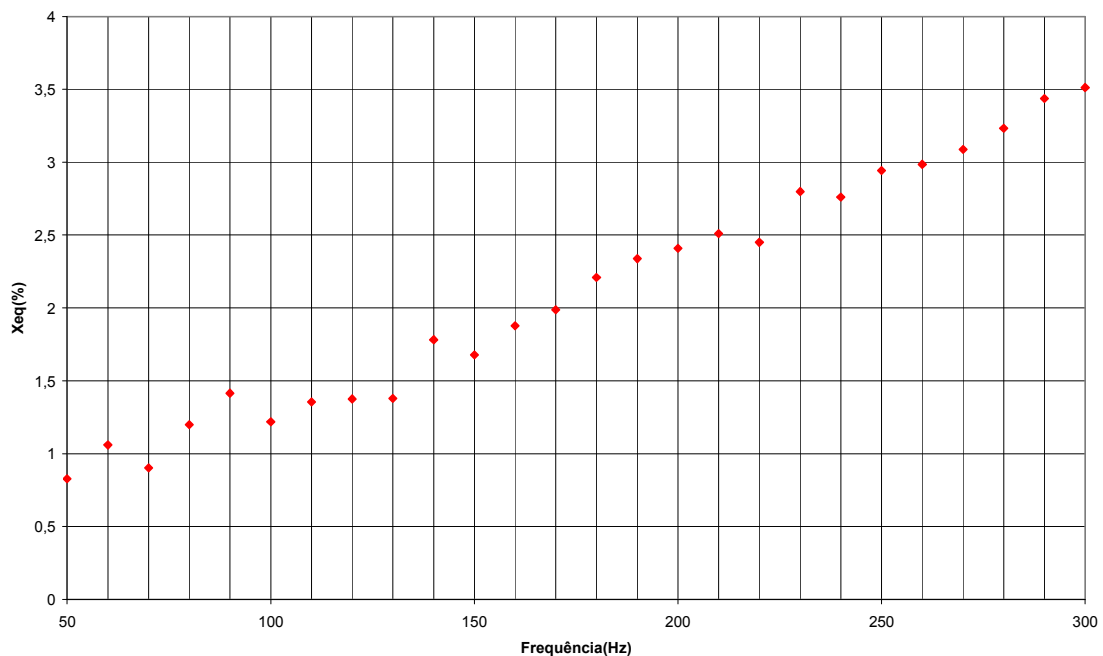


Figura 4.3 – Parâmetro  $X_{eq}$  (%) relativo ao fluxo de dispersão dos enrolamentos do transformador de 1 kVA.

A curva de  $X_{eq}$  mostra uma relação quase linear entre o fluxo e a frequência, esta curva pode ser visualizada na Figura 4.3. Por meio desta relação pode-se calcular o valor da indutância de dispersão  $L_{eq}$ , através da seguinte equação:

$$L_{eq} = \frac{X_{eq}}{2\pi f} \quad (\text{equação 4.1})$$

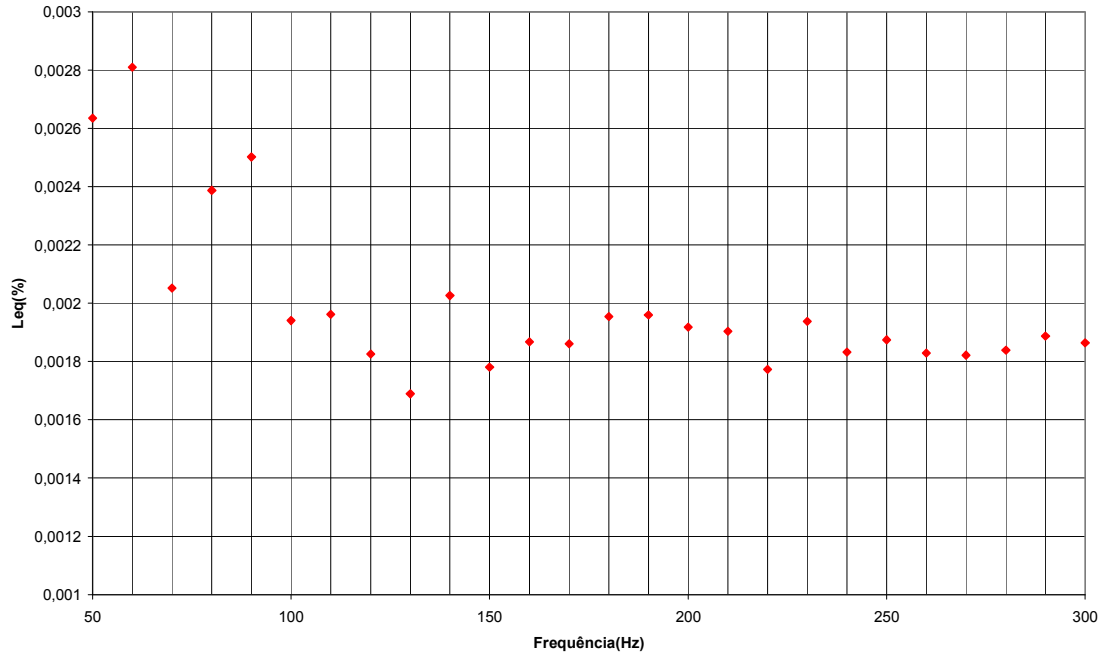


Figura 4.4 – Indutância  $L_{eq}$  do transformador de 1 kVA.

Na Figura 4.5 tem-se a curva relativa à impedância dos enrolamentos do transformador, representada por  $Z_{eq}$ , reforça-se aqui a idéia de que este ramo tem  $R_{eq}$  e  $X_{eq}$  em série.

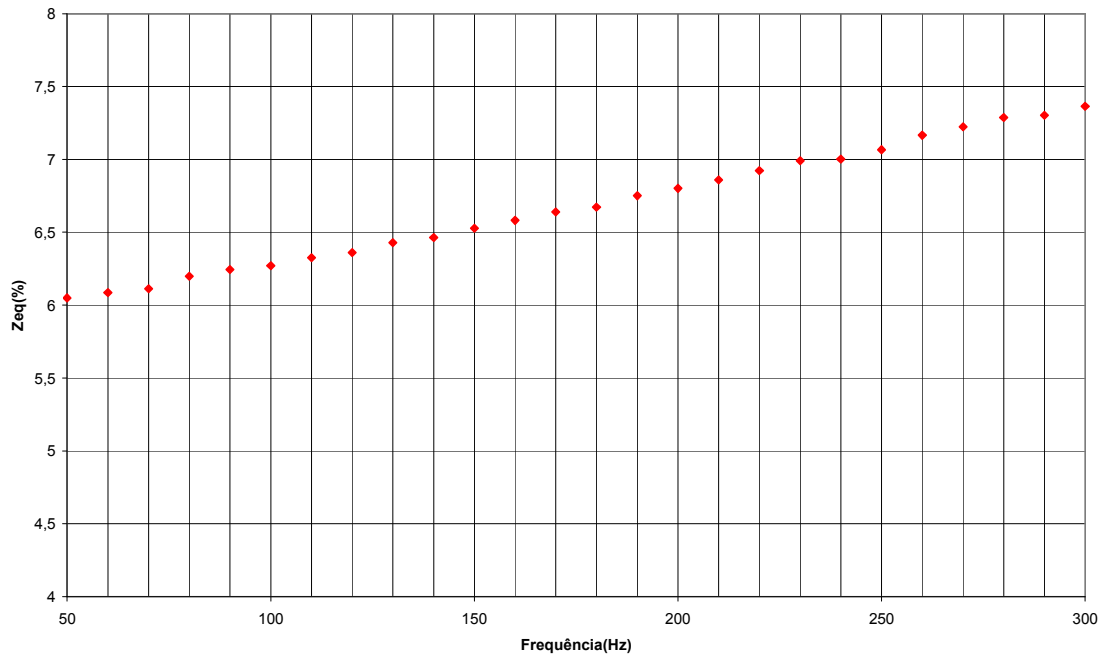


Figura 4.5 – Parâmetro  $Z_{eq}$  relativo à impedância equivalente dos enrolamentos do transformador de 1 kVA.

Pode-se perceber pela curva referente à impedância  $Z_{eq}$  que temos uma relação com uma forte característica linear e com variação do parâmetro ao longo das frequências em torno de 22%.

#### 4.2.2 Ensaio em vazio

Conforme procedimento citado no item 3.4.2, realizou-se o ensaio em vazio. É importante ressaltar a utilização do fator de potência no cálculo da potência P(kW) devido à limitação técnica por parte da fonte em não conseguir medir com precisão tal dado. Os valores obtidos com este ensaio estão dispostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados obtidos do ensaio em vazio. Transformador de 1 kVA.

$f$ (Hz)	$V_{ref}$ (V)	$V_{CA}$ (V)	$I_{CA}$ (A)	$P_{CA}$ (kW)	S(kVA)	FP
50	110	110,15	0,68	0,0075	0,075	0,10
60	110	110,14	0,26	0,0064	0,029	0,22
70	110	110,14	0,13	0,0054	0,014	0,39
80	110	110,13	0,09	0,0054	0,010	0,54
90	110	110,12	0,08	0,0054	0,009	0,60
100	110	110,14	0,07	0,0051	0,008	0,64
110	110	110,14	0,07	0,0051	0,008	0,64
120	110	110,13	0,07	0,0050	0,008	0,63
130	110	110,14	0,06	0,0044	0,007	0,63
140	110	110,15	0,06	0,0046	0,007	0,66
150	110	110,15	0,06	0,0045	0,007	0,64
160	110	110,14	0,06	0,0043	0,007	0,61
170	110	110,14	0,06	0,0045	0,007	0,65
180	110	110,13	0,06	0,0044	0,007	0,63
190	110	110,19	0,06	0,0043	0,007	0,62
200	110	110,19	0,05	0,0037	0,006	0,62
210	110	110,22	0,06	0,0042	0,007	0,61
220	110	110,22	0,06	0,0043	0,007	0,62
230	110	110,21	0,06	0,0041	0,007	0,59
240	110	110,21	0,06	0,0040	0,007	0,57
250	110	110,27	0,06	0,0043	0,007	0,62
260	110	110,27	0,06	0,0042	0,007	0,60
270	110	110,23	0,06	0,0040	0,007	0,57
280	110	110,28	0,06	0,0040	0,007	0,57
290	110	110,28	0,06	0,0039	0,007	0,57
300	110	110,29	0,06	0,0040	0,007	0,58

De posse desses dados, procedeu-se à normalização dos valores e na decomposição da corrente de magnetização  $I_0$  em suas respectivas componentes  $i_m$  e  $i_h$ . Esses valores podem ser visualizados na Tabela 4.3. Em seguida podem ser visualizadas as Figuras 4.6 e 4.7 que mostram as curvas relacionadas aos parâmetros do ramo de magnetização do transformador.

Tabela 4.3 – Valores Normalizados e parâmetros obtidos. Transformador de 1 kVA.

$f$ (Hz)	$V_o$ (pu)	$I_o$ (pu)	$P_o$ (pu)	$i_h$ (pu)	$i_m$ (pu)	$R_h$ (%)	$X_m$ (%)	$Z_m$ (%)
50	1,0013	0,0748	0,0075	0,0074	0,0744	13387,2	1345,4	1338,72
60	1,0012	0,0286	0,0063	0,0062	0,0278	15913,4	3588,8	3500,95
70	1,0012	0,0143	0,0054	0,0055	0,0131	17953,6	7604,0	7001,90
80	1,0011	0,0099	0,0054	0,0053	0,0083	18727,6	12015,4	10112,9
90	1,0010	0,0088	0,0054	0,0052	0,0070	18960,0	14220,0	11376,0
100	1,0012	0,0077	0,0051	0,0049	0,0059	20318,0	16923,4	13003,5
110	1,0012	0,0077	0,0051	0,0049	0,0059	20318,0	16923,4	13003,5
120	1,0011	0,0077	0,0050	0,0048	0,0059	20638,6	16742,7	13002,3
130	1,0012	0,0066	0,0044	0,0041	0,0051	24080,6	19535,0	15170,8
140	1,0013	0,0066	0,0046	0,0043	0,0049	22988,1	20195,4	15172,1
150	1,0013	0,0066	0,0044	0,0042	0,0050	23706,5	19745,8	15172,1
160	1,0012	0,0066	0,0042	0,0040	0,0052	24870,1	19145,3	15170,8
170	1,0012	0,0066	0,0045	0,0042	0,0050	23339,6	19963,3	15170,8
180	1,0011	0,0066	0,0044	0,0041	0,0051	24078,4	19533,2	15169,4
190	1,0017	0,0066	0,0043	0,0040	0,0051	24480,1	19344,4	15177,6
200	1,0017	0,0055	0,0037	0,0034	0,0043	29376,1	23213,3	18213,2
210	1,0020	0,0066	0,0042	0,0040	0,0052	24888,2	19159,2	15181,8
220	1,0020	0,0066	0,0043	0,0040	0,0051	24486,8	19349,7	15181,8
230	1,0019	0,0066	0,0041	0,0038	0,0053	25729,5	18801,5	15180,4
240	1,0019	0,0066	0,0039	0,0037	0,0054	26632,3	18475,6	15180,4
250	1,0024	0,0066	0,0043	0,0040	0,0051	24497,9	19358,4	15188,7
260	1,0024	0,0066	0,0042	0,0039	0,0052	25314,5	18985,8	15188,7
270	1,0020	0,0066	0,0039	0,0037	0,0054	26637,1	18479,0	15183,2
280	1,0025	0,0066	0,0039	0,0037	0,0054	26649,2	18487,4	15190,0
290	1,0025	0,0066	0,0039	0,0037	0,0054	26649,3	18487,4	15190,1
300	1,0026	0,0066	0,0040	0,0038	0,0053	26192,1	18648,6	15191,4

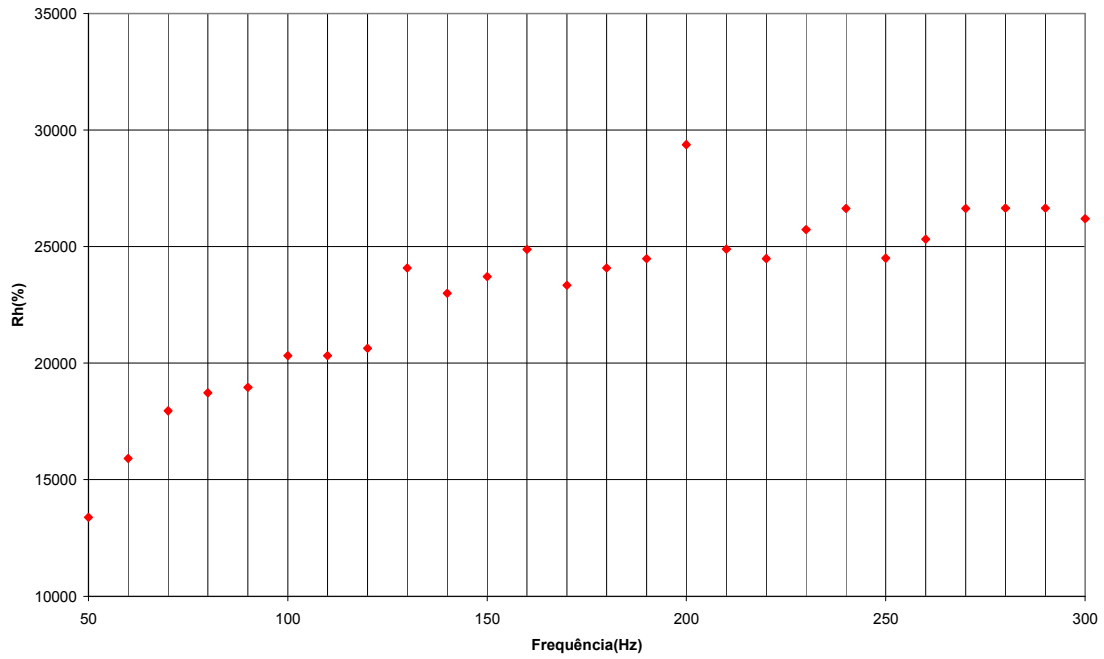


Figura 4.6 – Parâmetro  $R_h$  relativo às perdas no núcleo do transformador de 1 kVA.

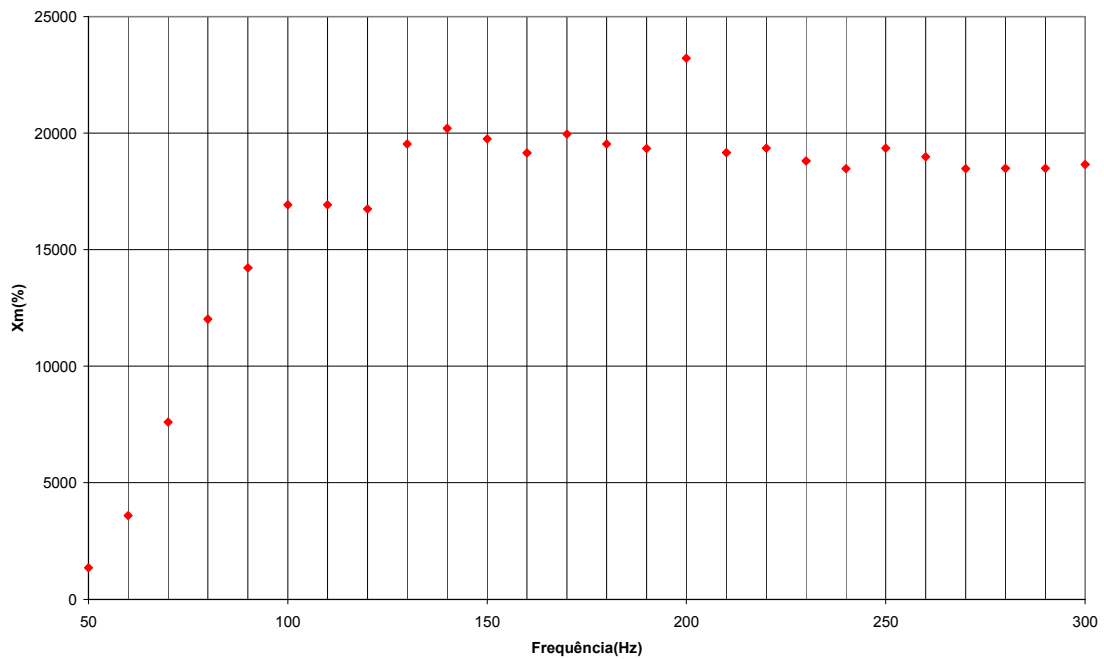


Figura 4.7 – Parâmetro  $X_m$  relativo ao fluxo de magnetização do núcleo do transformador de 1 kVA.



Pela análise dos diagramas de dispersão dos parâmetros relacionados a magnetização conclui-se estes não têm característica linear. Fato este já esperado, visto que a relação entre a corrente de excitação e o fluxo magnético é não linear.

A Figura 4.8 mostra o diagrama relativo ao parâmetro que representa a impedância do núcleo  $Z_m$ , esse se dá pela associação em paralelo dos componentes. Percebe-se uma clara semelhança entre  $Z_m$  e  $X_m$ , isso se dá devido ao fato de que na associação em paralelo entre  $X_m$  e  $R_h$ ,  $X_m$  é dominante devido ao seu menor valor em módulo.

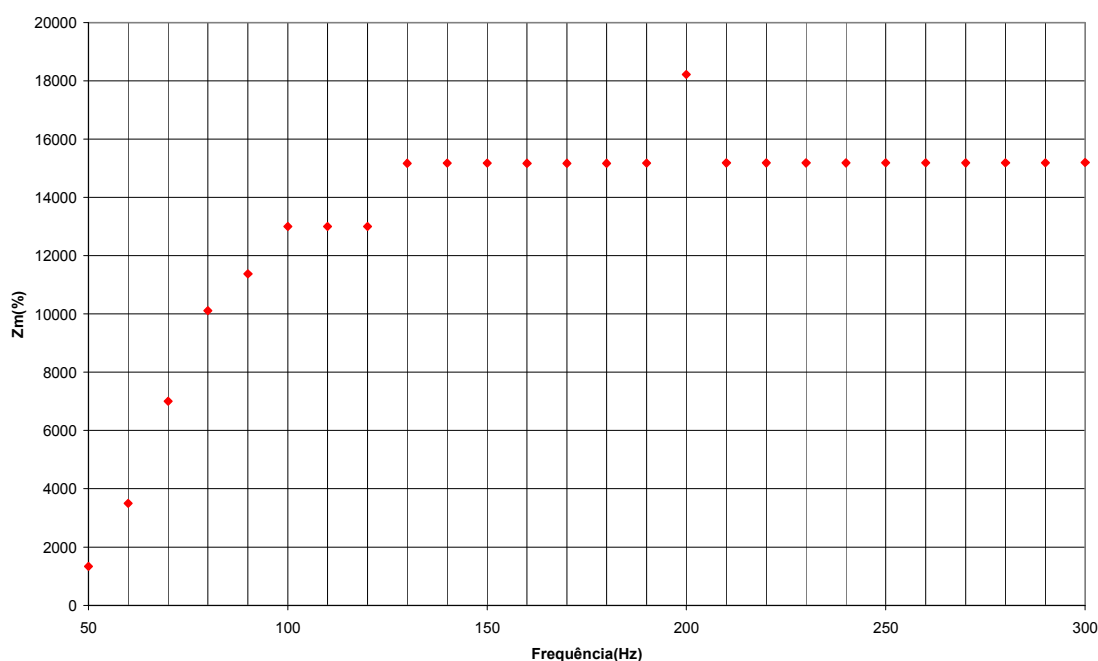


Figura 4.8 – Parâmetro  $Z_m$  relativo à impedância modelada do núcleo do transformador de 1 kVA.

### 4.3 Ensaios do Transformador de 3 kVA

A seguinte seção tem como finalidade apresentar os dados experimentais e obter os parâmetros do circuito equivalente do transformador de 3 kVA. Divide-se em duas sub-seções: a primeira é relativa ao ensaio em curto-circuito, que visa determinar os parâmetros relativos às perdas e ao fluxo de dispersão nos enrolamentos do transformador. A segunda sub-seção é relativa ao ensaio em vazio e visa a determinação

dos parâmetros relativos às perdas e ao fluxo de magnetização do núcleo do transformador.

#### 4.3.1 Ensaio em curto-circuito

Seguindo o procedimento descrito no item 3.4.1, realizou-se o ensaio em curto-circuito no transformador de 3 kVA de modo a determinar os parâmetros  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$  e  $Z_{eq}$  do transformador em questão. Os dados e resultados estão dispostos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados relativos ao ensaio em curto-circuito. Transformador de 3 kVA.

Variáveis Medidas				Cálculo da Impedância série		
$f$ (Hz)	$V_{cc}$ (V)	$I_{cc}$ (A)	$P_{cc}$ (kW)	$R_{eq}$ (%)	$X_{eq}$ (%)	$Z_{eq}$ (%)
50	5,84	13,75	0,0776	2,552	0,679	2,641
60	5,91	13,71	0,0777	2,572	0,753	2,680
70	5,99	13,65	0,0779	2,600	0,828	2,729
80	6,16	13,73	0,0799	2,635	0,914	2,790
90	6,22	13,64	0,0790	2,642	1,029	2,835
100	6,38	13,69	0,0800	2,656	1,160	2,898
110	6,54	13,72	0,0819	2,705	1,211	2,964
120	6,72	13,72	0,0818	2,705	1,400	3,046
130	6,88	13,75	0,0836	2,749	1,456	3,111
140	7,03	13,74	0,0844	2,779	1,548	3,181
150	7,19	13,72	0,0841	2,780	1,700	3,259
160	7,35	13,72	0,0848	2,802	1,800	3,331
170	7,50	13,70	0,0855	2,832	1,888	3,404
180	7,65	13,68	0,0850	2,826	2,026	3,477
190	7,81	13,69	0,0856	2,840	2,125	3,547
200	7,97	13,69	0,0850	2,821	2,269	3,620
210	8,13	13,66	0,0854	2,848	2,363	3,701
220	8,36	13,74	0,0874	2,879	2,455	3,783
230	8,49	13,68	0,0858	2,852	2,599	3,859
240	8,65	13,64	0,0861	2,879	2,695	3,943
250	8,89	13,71	0,0878	2,906	2,795	4,032
260	9,04	13,66	0,0873	2,910	2,909	4,115
270	9,26	13,70	0,0889	2,945	2,998	4,203
280	9,42	13,67	0,0877	2,919	3,137	4,285
290	9,65	13,69	0,0884	2,934	3,256	4,383
300	9,79	13,63	0,0878	2,938	3,364	4,467

A resposta em frequência deste transformador pode ser visualizada nas Figuras 4.9 e 4.11, as quais representam os parâmetros associados à perda Joule e ao fluxo de dispersão, respectivamente. Para uma melhor visualização da relação entre a

modelagem das perdas através do parâmetro  $R_{eq}$ , mostra-se na Figura 4.10 o gráfico relativo a potência de curto-circuito em função da frequência.

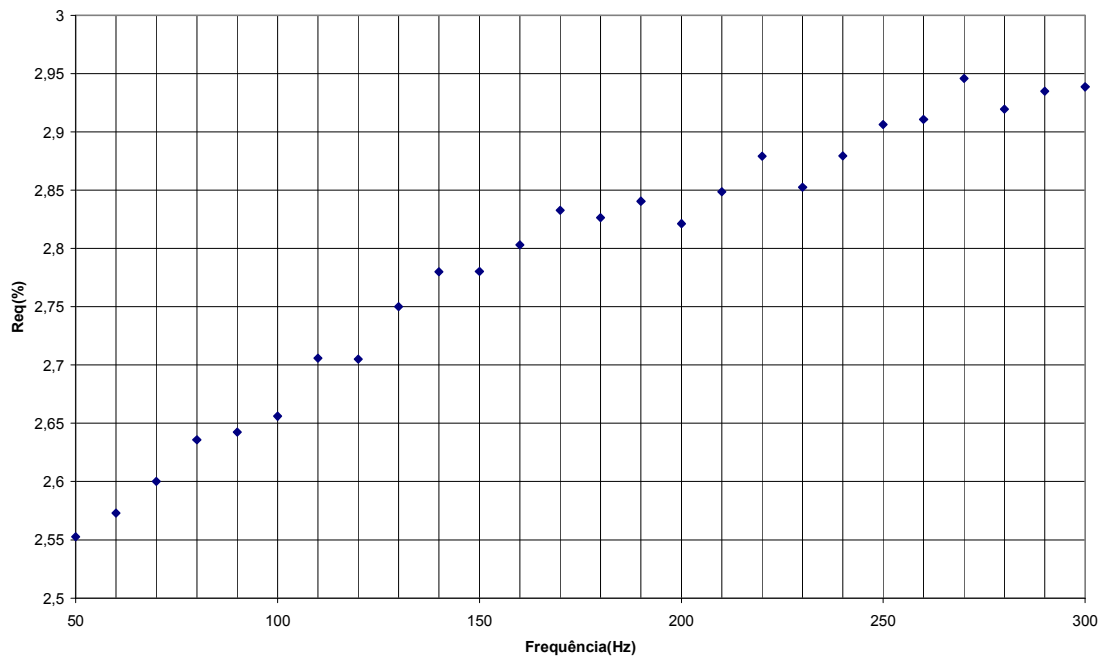


Figura 4.9 – Parâmetro  $R_{eq}$  (%) relativo à perda Joule do transformador de 3 kVA.

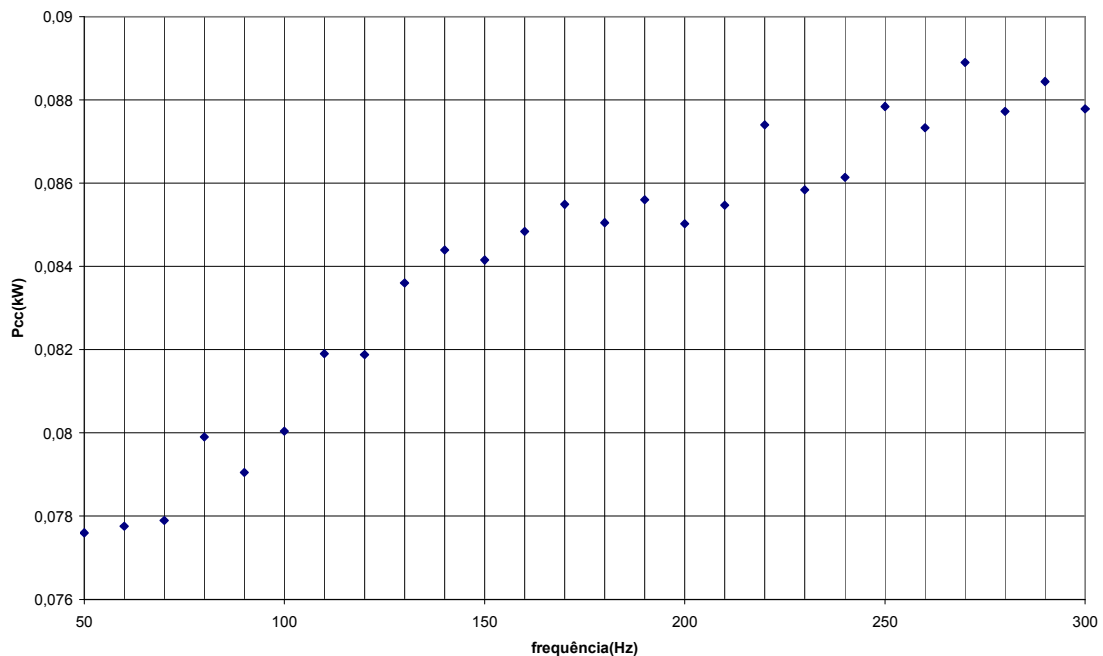


Figura 4.10 – Potência de curto-circuito em função da frequência para o transformador de 3 kVA.

Através do diagrama de dispersão relativo ao parâmetro  $R_{eq}$  pode-se perceber uma relação proporcional entre a frequência e o parâmetro  $R_{eq}$ , como observado no transformador de 1 kVA. Existe uma variação de aproximadamente 15% ao longo deste intervalo de frequências, variação esta relativamente maior do que a variação encontrada no transformador de 1 kVA. Observa-se que a potência de curto-circuito é proporcional ao aumento da frequência. Esse aumento é de 13%, praticamente o dobro do aumento do transformador de 1 kVA. Reforça-se aqui a importância de observar que o parâmetro  $R_{eq}$  está diretamente e intimamente relacionado com a potência consumida pelo transformador no ensaio em curto-circuito.

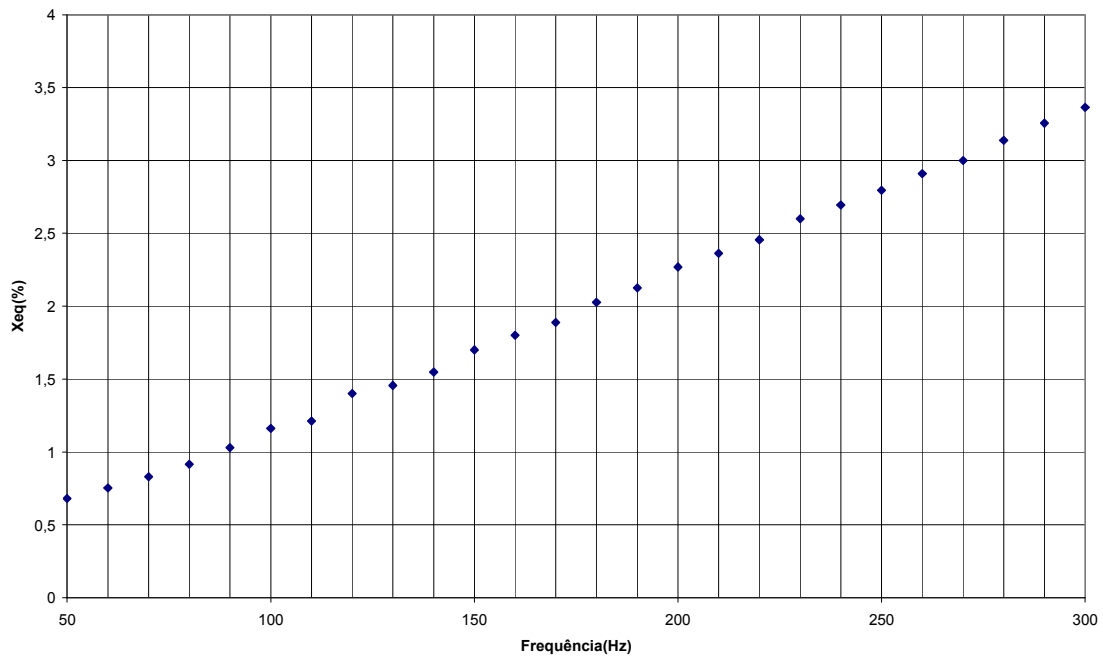


Figura 4.11 – Parâmetro  $X_{eq}$  (%) relativo ao fluxo de dispersão nos enrolamentos do transformador de 3 kVA.

O diagrama de dispersão relativo ao fluxo, modelado por  $X_{eq}$  mostra uma relação praticamente linear entre  $X_{eq}$  e a frequência. Através desta relação pode-se calcular o valor da indutância de dispersão  $L_{eq}$ , através da seguinte relação e que pode ser visualizada no gráfico mostrado na Figura 4.12:

$$L_{eq} = X_{eq} / 2\pi f$$

(equação 4.1)

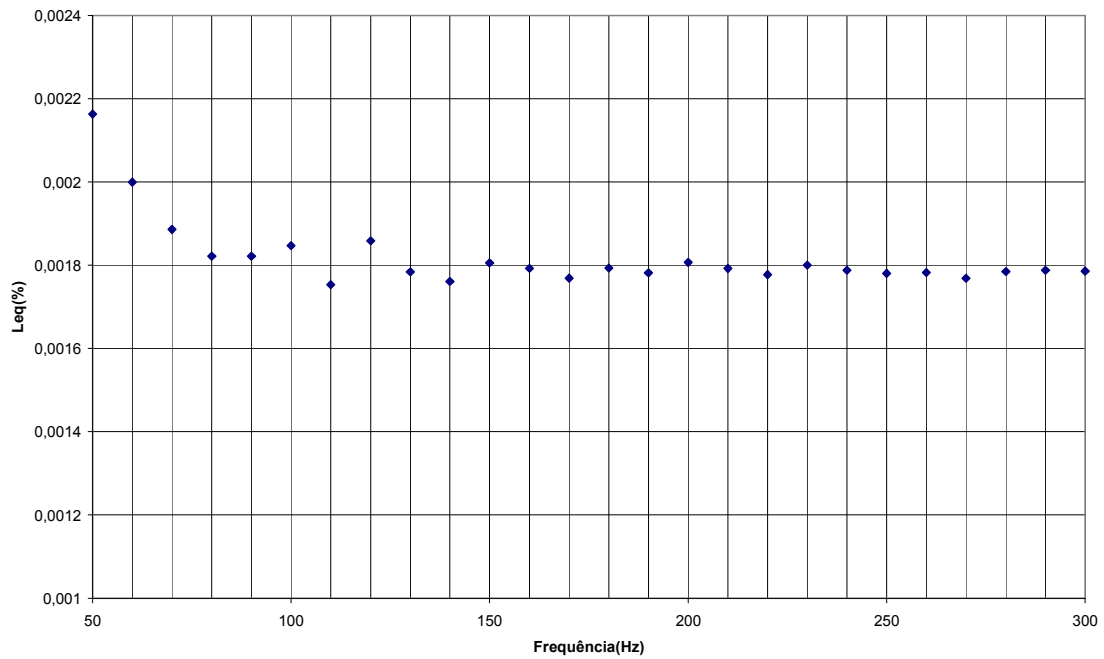


Figura 4.12 – Indutância  $L_{eq}$  do transformador de 3 kVA.

Na Figura 4.13 tem-se a curva relativa à impedância dos enrolamentos do transformador, representado por  $Z_{eq}$ , reforça-se aqui a idéia de que este ramo tem  $R_{eq}$  e  $X_{eq}$  em série.

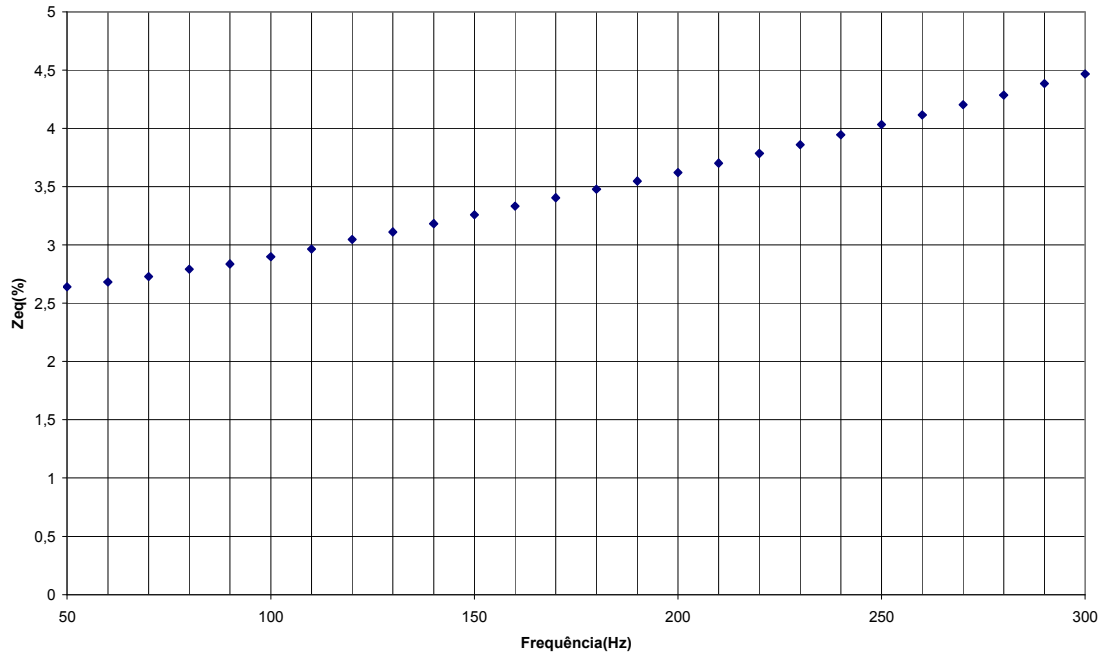


Figura 4.13 – Parâmetro  $Z_{eq}$  relativo à impedância equivalente dos enrolamentos do transformador de 3 kVA.

Percebe-se por meio da curva relativa à  $Z_{eq}$  que existe uma relação com uma forte característica linear e com variação do parâmetro ao longo das frequências em torno de 70%. Tal fato se diferencia bastante do transformador de 1 kVA que teve uma variação em torno de 22%.

#### 4.3.2 Ensaio em vazio

Conforme procedimento citado no item 3.4.2, realizou-se o ensaio em vazio. É importante ressaltar novamente a utilização do fator de potência no cálculo da potência  $P_{CA}$  (kW) devido à limitação técnica por parte da fonte em não conseguir medir com precisão tal dado. Os valores obtidos com este ensaio estão dispostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Dados obtidos do ensaio em vazio. Transformador de 3 kVA.

$f$ (Hz)	$V_{ref}$ (V)	$V_{CA}$ (V)	$I_{CA}$ (A)	$P_{CA}$ (kW)	S(kVA)	FP
50	110	110,15	0,67	0,016	0,074	0,22
60	110	110,14	0,34	0,013	0,037	0,37
70	110	110,14	0,22	0,012	0,024	0,53
80	110	110,1	0,17	0,012	0,019	0,64
90	110	110,12	0,15	0,011	0,017	0,66
100	110	110,14	0,14	0,010	0,015	0,71
110	110	110,15	0,13	0,010	0,014	0,72
120	110	110,12	0,12	0,009	0,013	0,75
130	110	110,16	0,12	0,009	0,013	0,74
140	110	110,17	0,11	0,009	0,012	0,75
150	110	110,19	0,11	0,009	0,012	0,75
160	110	110,14	0,11	0,009	0,012	0,76
170	110	110,16	0,11	0,009	0,012	0,75
180	110	110,17	0,11	0,009	0,012	0,76
190	110	110,18	0,10	0,008	0,011	0,76
200	110	110,23	0,10	0,007	0,011	0,71
210	110	110,22	0,10	0,008	0,011	0,74
220	110	110,26	0,10	0,008	0,011	0,72
230	110	110,25	0,10	0,008	0,011	0,72
240	110	110,24	0,11	0,008	0,012	0,69
250	110	110,28	0,11	0,008	0,012	0,68
260	110	110,27	0,11	0,007	0,012	0,65
270	110	110,27	0,11	0,007	0,012	0,65
280	110	110,30	0,11	0,007	0,012	0,64
290	110	110,32	0,11	0,007	0,012	0,63
300	110	110,30	0,11	0,007	0,012	0,61

De posse desses dados, procede-se à normalização dos valores e na decomposição da corrente de magnetização  $I_0$  em suas respectivas componentes  $i_m$  e  $i_h$ . Esses valores podem ser visualizados na Tabela 4.6. Em seguida podem ser visualizadas as Figuras 4.14 e 4.15 que mostram as curvas relacionadas aos parâmetros do ramo de magnetização.

Tabela 4.6 – Valores Normalizados e parâmetros obtidos. Transformador de 3 kVA.

$f$ (Hz)	$V_o$ (pu)	$I_o$ (pu)	$P_o$ (pu)	$i_h$ (pu)	$i_m$ (pu)	$R_h$ (%)	$X_m$ (%)	$Z_m$ (%)
50	1,0013	0,0245	0,0054	0,0053	0,0238	18589,5	4192,4	4089,7
60	1,0012	0,0124	0,0045	0,0045	0,0115	21779,3	8673,9	8058,3
70	1,0012	0,0080	0,0042	0,0042	0,0068	23497,8	14686,1	12453,8
80	1,0009	0,0062	0,0040	0,0039	0,0047	25173,2	20967,4	16110,8
90	1,0010	0,0054	0,0037	0,0036	0,0041	27670,1	24308,7	18262,3
100	1,0012	0,0051	0,0035	0,0036	0,0036	27563,8	27790,8	19570,3
110	1,0013	0,0047	0,0033	0,0034	0,0032	29274,5	30372,3	21077,6
120	1,0010	0,0043	0,0032	0,0032	0,0029	30437,2	34512,5	22827,9
130	1,0014	0,0043	0,0032	0,0032	0,0025	30859,7	33951,7	22836,2
140	1,0015	0,0040	0,0029	0,0030	0,0026	33219,3	37667,1	24914,4
150	1,0017	0,0040	0,0029	0,0030	0,0026	33225,3	37673,9	24919,0
160	1,0012	0,0040	0,0030	0,0030	0,0026	32773,2	38324,0	24907,6
170	1,0014	0,0040	0,0029	0,0030	0,0026	33216,2	37663,7	24912,2
180	1,0015	0,0040	0,0030	0,0030	0,0026	32782,2	38334,5	24914,4
190	1,0016	0,0036	0,0027	0,0027	0,0023	36063,7	42171,7	27408,4
200	1,0021	0,0036	0,0025	0,0026	0,0026	38620,9	38938,9	27420,8
210	1,0020	0,0036	0,0027	0,0027	0,0024	37051,8	40764,3	27418,3
220	1,0023	0,0036	0,0026	0,0026	0,0025	38094,8	39523,5	27428,3
230	1,0022	0,0036	0,0026	0,0026	0,0025	38091,4	39519,9	27425,8
240	1,0022	0,0040	0,0027	0,0027	0,0029	36130,8	34443,2	24930,3
250	1,0025	0,0040	0,0027	0,0027	0,0029	36675,5	34013,8	24939,3
260	1,0024	0,0040	0,0025	0,0026	0,0030	38364,7	32814,8	24937,0
270	1,0024	0,0040	0,0025	0,0026	0,0030	38364,7	32814,8	24937,0
280	1,0027	0,0040	0,0025	0,0025	0,0031	38974,8	32463,1	24943,8
290	1,0029	0,0040	0,0025	0,0025	0,0031	39600,6	32125,3	24948,4
300	1,0027	0,0040	0,0024	0,0024	0,0032	40891,6	31478,8	24943,8



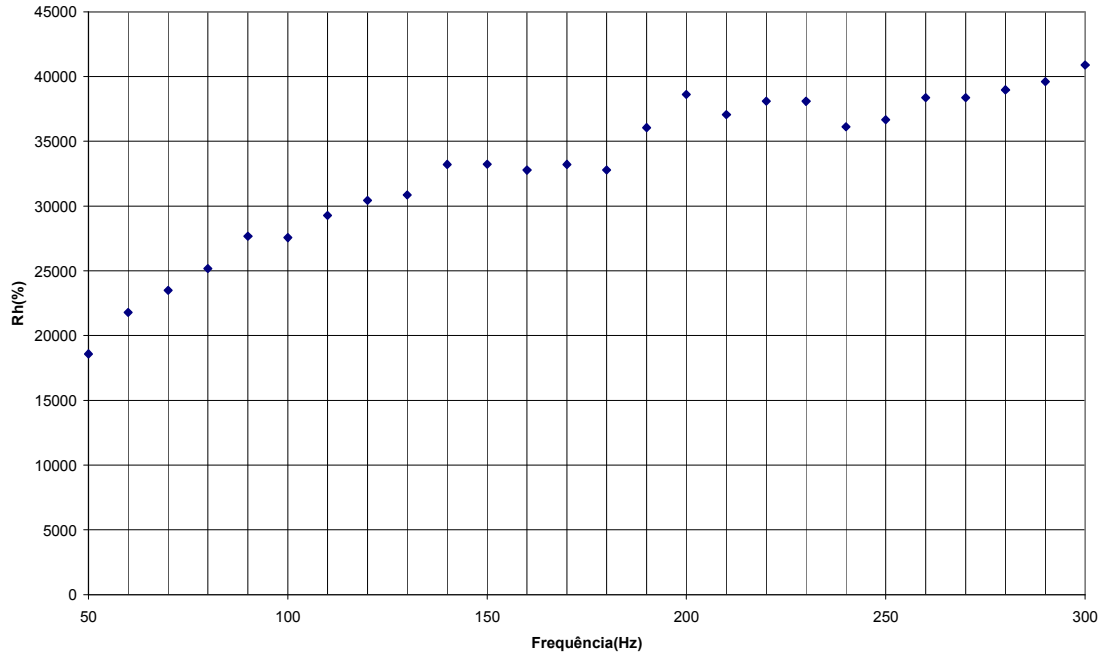


Figura 4.14 – Parâmetro  $R_h$  relativo às perdas no núcleo do transformador de 3 kVA.

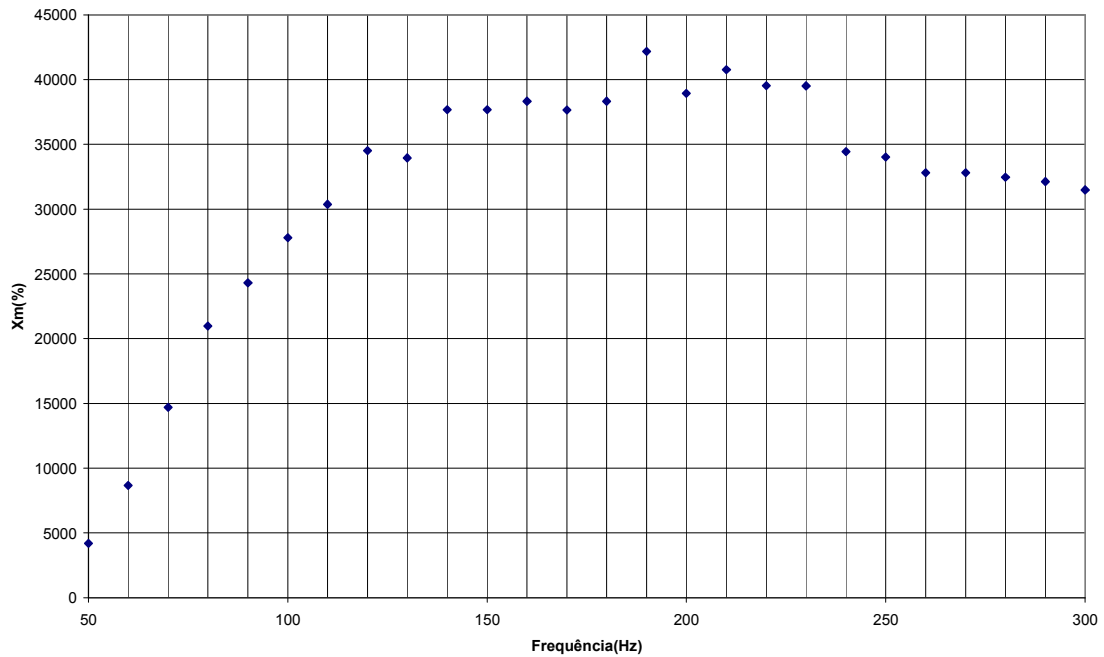


Figura 4.15 – Parâmetro  $X_m$  relativo ao fluxo de magnetização do núcleo do transformador de 3 kVA.

Pela análise das curvas apresentadas a respeito dos parâmetros relacionados à magnetização chegamos à conclusão de que estes não têm característica linear. Fato este já esperado, visto que a relação entre a corrente de excitação e o fluxo de magnetização é não linear, algo semelhante ao ocorrido com o transformador de 1 kVA.

A Figura 4.16 mostra o diagrama relativo ao parâmetro que representa a impedância do núcleo  $Z_m$ , esse se dá pela associação em paralelo dos componentes. Do mesmo modo como ocorreu com o transformador de 1 kVA, percebe-se uma clara semelhança entre  $Z_m$  e  $X_m$ , isso se dá devido ao fato de que na associação em paralelo entre  $X_m$  e  $R_h$ ,  $X_m$  é dominante devido ao seu menor valor em módulo.

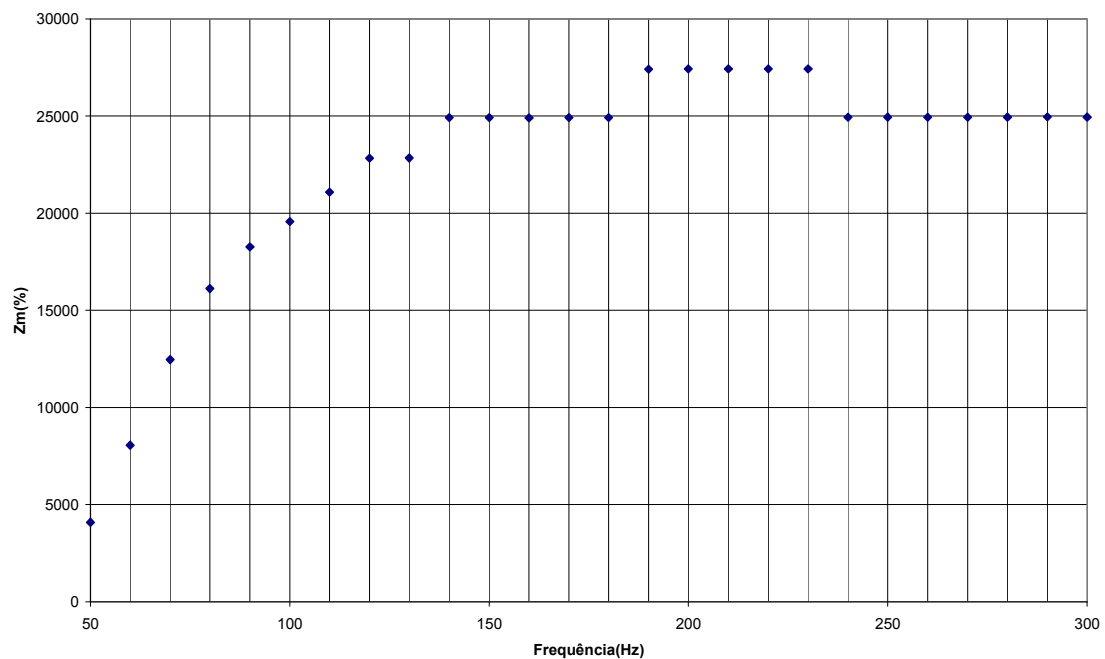


Figura 4.16 – Parâmetro  $Z_m$  relativo à impedância modelada do núcleo do transformador de 3 kVA.

#### 4.4 Comparação com o modelo “convencional”

De acordo com o item 3.5.1 do capítulo metodologia, uma breve comparação dos parâmetros obtidos por meio de ensaios será feita com os dados da teoria convencional. Essa seção é de importância fundamental pois tem como objeto principal demonstrar que o modelo utilizado atualmente é falho em questões cruciais do

transformador, tais como a não linearidade da indutância do núcleo do transformador por exemplo. A Tabela 4.7 mostra esses dados já calculados por meio das relações 4.1, 3.16 e 3.17. Nesta Tabela tem-se os parâmetros  $R_{eq}$  e  $R_h$  calculados através dos modelos teóricos com o fator h (equação 3.16) e h/2 (equação 3.17), tem-se também os parâmetros  $X_{eq}$  e  $X_m$  calculados através da equação 4.1, como explicitado no item 3.51. Na coluna dados experimentais estão dispostos os parâmetros obtidos por meio dos ensaios. As Figuras 4.17 a 4.20 mostram as curvas relativas aos parâmetros  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$ ,  $R_h$  e  $X_m$  do transformador de 1 kVA, respectivamente.

Tabela 4.7 – Tabela comparativa entre os dados experimentais e o modelo convencional para o transformador de 1 kVA.

Frequência	Modelo Teórico (h)		Modelo Teórico (h/2)		Modelo Teórico		Dados experimentais			
	$R_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$X_m$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$X_m$ (pu)
50	5,47	14526,91	3,87	10272,07	0,88	2990,73	5,99	0,83	13387,21	1345,47
60	5,99	15913,43	4,24	11252,49	1,06	3588,88	5,99	1,06	15913,43	3588,88
70	6,47	17188,47	4,58	12154,08	1,23	4187,03	6,05	0,9	17953,61	7604,03
80	6,92	18375,25	4,89	12993,26	1,41	4785,18	6,08	1,2	18727,68	12015,4
90	7,34	19489,89	5,19	13781,43	1,59	5383,32	6,08	1,41	18960,06	14220
100	7,74	20544,15	5,47	14526,91	1,76	5981,47	6,15	1,22	20318,03	16923,4
110	8,11	21546,89	5,74	15235,95	1,94	6579,62	6,18	1,36	20318,03	16923,4
120	8,48	22504,99	5,99	15913,43	2,12	7177,76	6,21	1,38	20638,67	16742,8
130	8,82	23423,93	6,24	16563,22	2,29	7775,91	6,28	1,38	24080,63	19535
140	9,15	24308,17	6,47	17188,47	2,47	8374,06	6,21	1,78	22988,15	20195,5
150	9,48	25161,34	6,7	17791,76	2,65	8972,2	6,31	1,68	23706,53	19745,8
160	9,79	25986,52	6,92	18375,25	2,82	9570,35	6,31	1,88	24870,16	19145,3
170	10,1	26786,29	7,13	18940,77	3,00	10168,5	6,34	1,99	23339,69	19963,3
180	10,4	27562,87	7,34	19489,89	3,18	10766,6	6,3	2,21	24078,45	19533,2
190	10,7	28318,16	7,54	20023,96	3,35	11364,8	6,33	2,34	24480,14	19344,4
200	10,9	29053,82	7,74	20544,15	3,53	11962,9	6,36	2,41	29376,17	23213,3
210	11,2	29771,3	7,93	21051,49	3,70	12561,1	6,38	2,51	24888,23	19159,3
220	11,5	30471,9	8,11	21546,89	3,88	13159,2	6,48	2,45	24486,8	19349,7
230	11,7	31156,75	8,3	22031,15	4,06	13757,4	6,41	2,8	25729,56	18801,6
240	12	31826,86	8,48	22504,99	4,23	14355,5	6,43	2,76	26632,35	18475,7
250	12,2	32483,15	8,65	22969,06	4,41	14953,7	6,43	2,94	24497,91	19358,5
260	12,5	33126,45	8,82	23423,93	4,59	15551,8	6,51	2,99	25314,51	18985,9
270	12,7	33757,48	8,99	23870,15	4,76	16150	6,53	3,09	26637,19	18479
280	12,9	34376,94	9,15	24308,17	4,94	16748,1	6,53	3,23	26649,27	18487,4
290	13,2	34985,43	9,32	24738,43	5,12	17346,3	6,44	3,44	26649,27	18487,4
300	13,4	35583,51	9,48	25161,34	5,29	17944,4	6,47	3,51	26192,17	18648,6

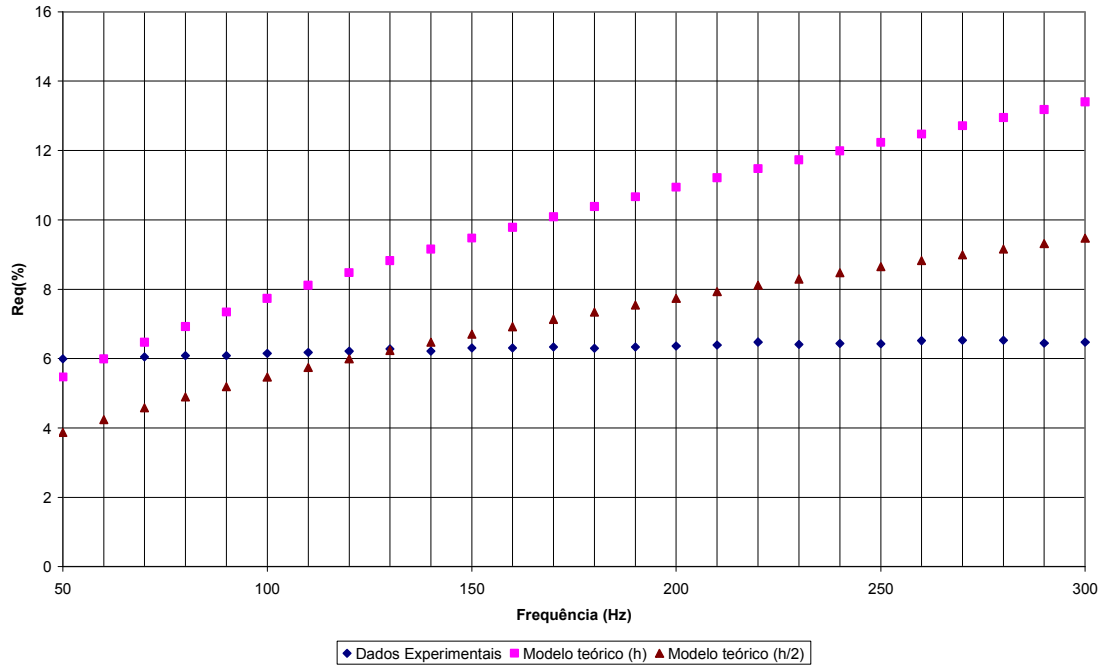


Figura 4.17 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_{eq}$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

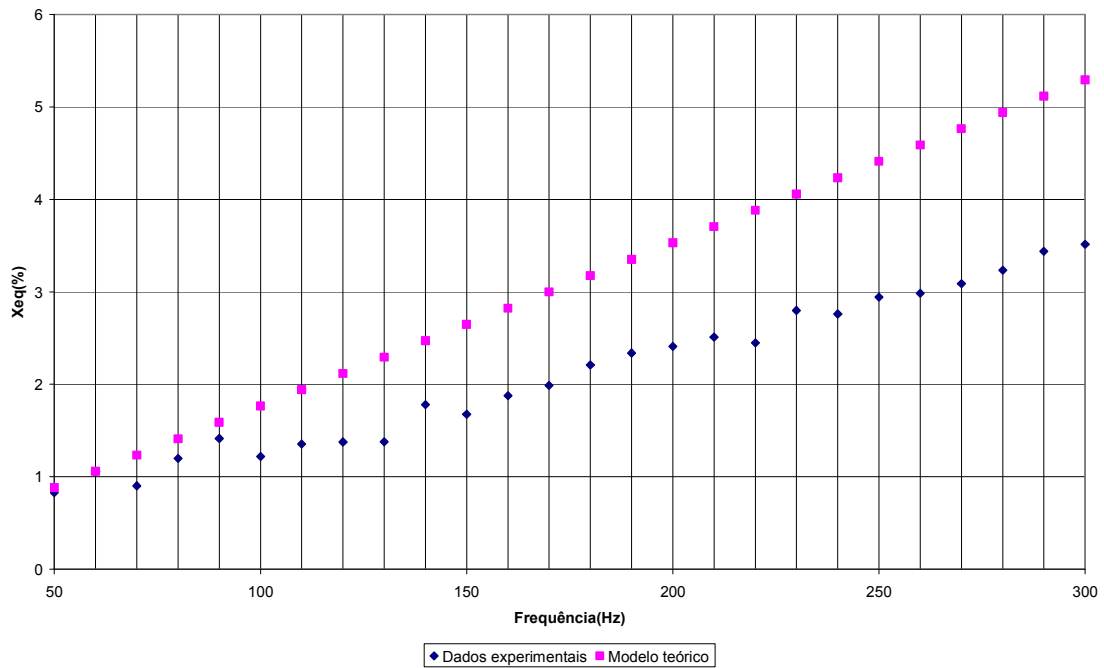


Figura 4.18 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_{eq}$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

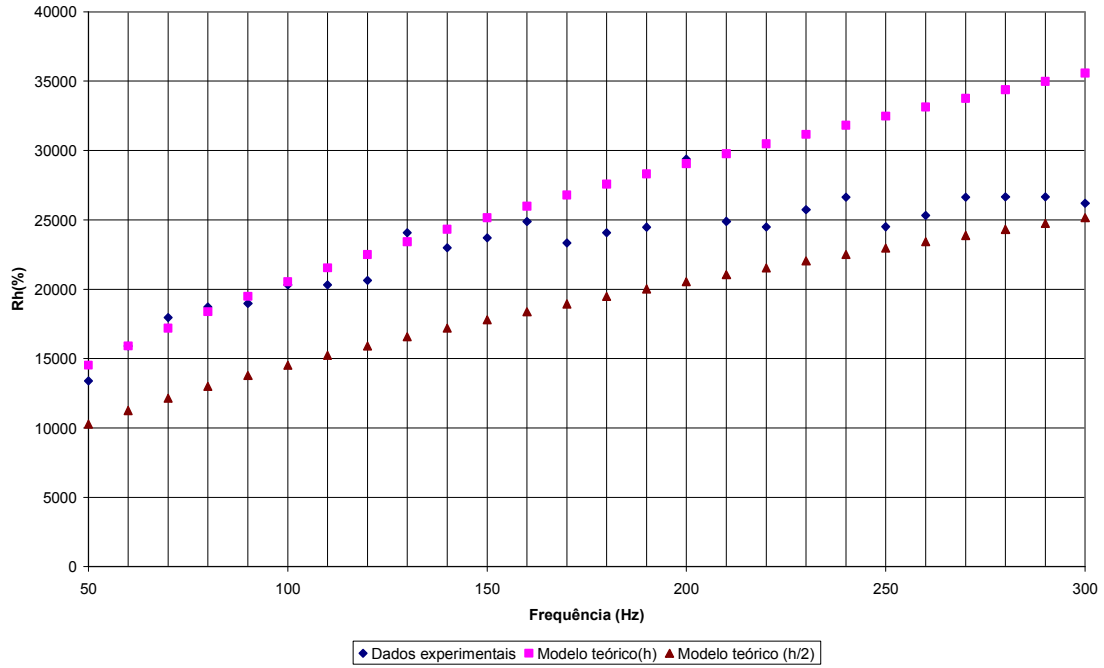


Figura 4.19 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_h$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

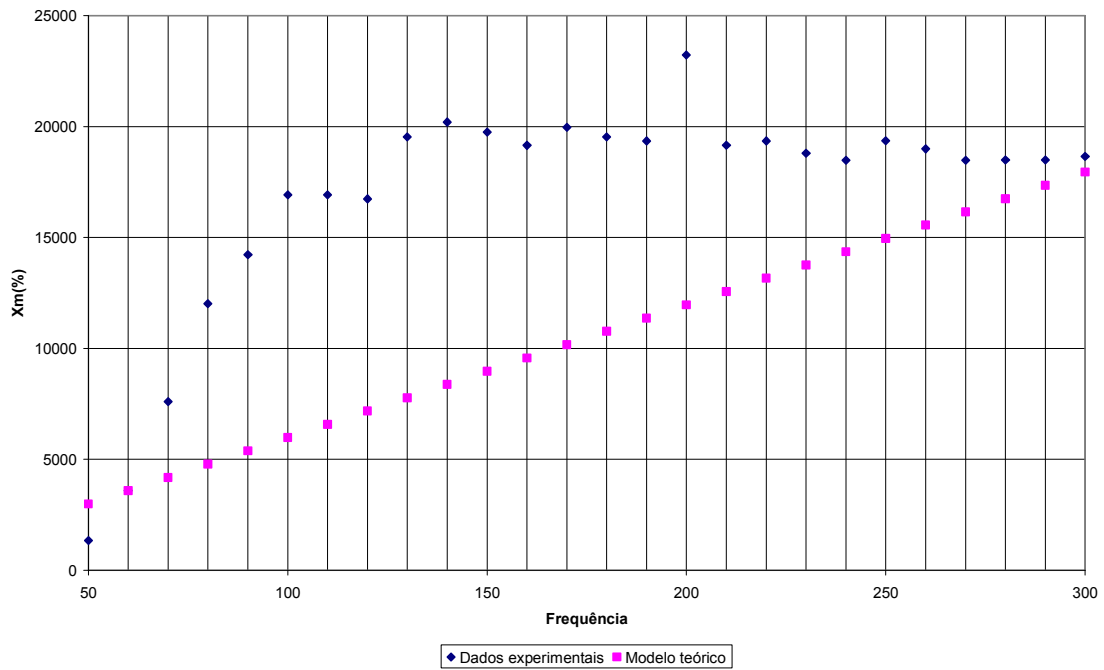


Figura 4.20 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_m$  obtidos para o transformador de 1 kVA.

Percebe-se pela análise gráfica que para o parâmetro que representa perdas nos enrolamentos  $R_{eq}$ , somente ocorre proximidade dos dados experimentais com o modelo clássico até a frequência de 120 Hz.

No caso do parâmetro que modela a dispersão do fluxo magnético nos enrolamentos,  $X_{eq}$ , percebe-se que, apesar dos dados experimentais não seguirem uma tendência linear, eles crescem acompanhando a curva do modelo clássico.

Para o parâmetro que representa as perdas no núcleo,  $R_h$ , os dados experimentais se encontram na grande maioria das vezes entre os valores das curvas teóricas.

No caso do parâmetro que modela a dispersão do fluxo de magnetização,  $X_m$ , não existe semelhança alguma entre a curva dos dados experimentais com os dados teóricos.

Repete-se o mesmo procedimento para o transformador de 3 kVA em seguida. A Tabela 4.8 mostra os parâmetros de modelagem já calculados através das relações 4.1, 3.16 e 3.17. As Figuras 4.21 a 4.24 mostram as curvas relativas aos parâmetros  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$ ,  $R_h$  e  $X_m$  do transformador de 3 kVA, respectivamente.

Tabela 4.8 – Tabela comparativa entre os dados experimentais e o modelo convencional para o transformador de 3 kVA.

Frequência	Modelo Teórico (h)		Modelo Teórico (h/2)		Modelo Teórico		Dados experimentais			
	$R_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$X_m$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$X_m$ (pu)
50	2,35	19881,76	1,66	14058,53	0,63	7228,29	2,55	0,68	18589,52	4192,41
60	2,57	21779,38	1,82	15400,35	0,75	8673,95	2,57	0,75	21779,38	8673,95
70	2,78	23524,42	1,96	16634,28	0,88	10119,6	2,6	0,83	23497,82	14686,2
80	2,97	25148,66	2,1	17782,79	1,00	11565,3	2,64	0,91	25173,27	20967,5
90	3,15	26674,19	2,23	18861,5	1,13	13010,9	2,64	1,03	27670,19	24308,7
100	3,32	28117,06	2,35	19881,76	1,26	14456,6	2,66	1,16	27563,85	27790,8
110	3,48	29489,42	2,46	20852,17	1,38	15902,2	2,71	1,21	29274,52	30372,4
120	3,64	30800,7	2,57	21779,38	1,51	17347,9	2,71	1,4	30437,21	34512,6
130	3,79	32058,38	2,68	22668,7	1,63	18793,6	2,75	1,46	30859,73	33951,8
140	3,93	33268,56	2,78	23524,42	1,76	20239,2	2,78	1,55	33219,3	37667,1
150	4,07	34436,23	2,88	24350,09	1,88	21684,9	2,78	1,7	33225,33	37674
160	4,2	35565,58	2,97	25148,66	2,01	23130,5	2,8	1,8	32773,28	38324,1
170	4,33	36660,16	3,06	25922,65	2,13	24576,2	2,83	1,89	33216,29	37663,7
180	4,46	37723	3,15	26674,19	2,26	26021,8	2,83	2,03	32782,21	38334,5
190	4,58	38756,69	3,24	27405,12	2,39	27467,5	2,84	2,13	36063,7	42171,8
200	4,7	39763,53	3,32	28117,06	2,51	28913,2	2,82	2,27	38620,92	38938,9
210	4,81	40745,49	3,4	28811,41	2,64	30358,8	2,85	2,36	37051,84	40764,3
220	4,93	41704,34	3,48	29489,42	2,76	31804,5	2,88	2,46	38094,88	39523,5
230	5,04	42641,64	3,56	30152,19	2,89	33250,1	2,85	2,6	38091,43	39520
240	5,15	43558,76	3,64	30800,7	3,01	34695,8	2,88	2,7	36130,88	34443,2
250	5,25	44456,98	3,71	31435,83	3,14	36141,4	2,91	2,8	36675,52	34013,8
260	5,36	45337,4	3,79	32058,38	3,27	37587,1	2,91	2,91	38364,76	32814,8
270	5,46	46201,05	3,86	32669,07	3,39	39032,8	2,95	3	38364,76	32814,8
280	5,56	47048,84	3,93	33268,56	3,52	40478,4	2,92	3,14	38974,81	32463,2
290	5,66	47881,63	4	33857,43	3,64	41924,1	2,93	3,26	39600,63	32125,4
300	5,75	48700,18	4,07	34436,23	3,77	43369,7	2,94	3,36	40891,6	31478,8

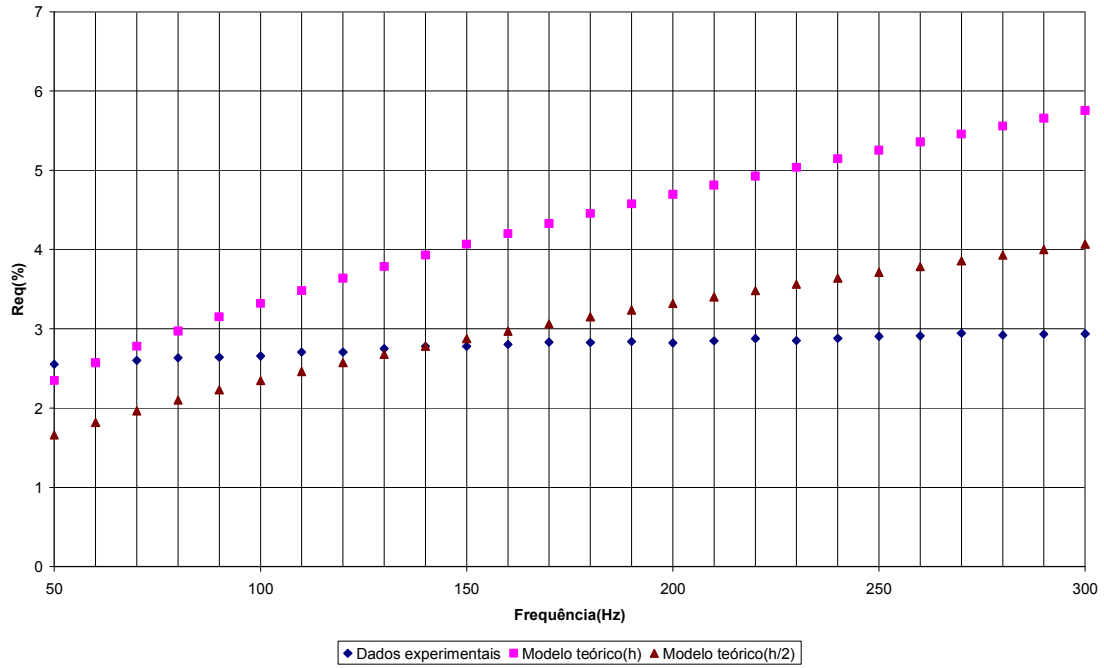


Figura 4.21 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_{eq}$  obtidos para o transformador de 3 kVA.

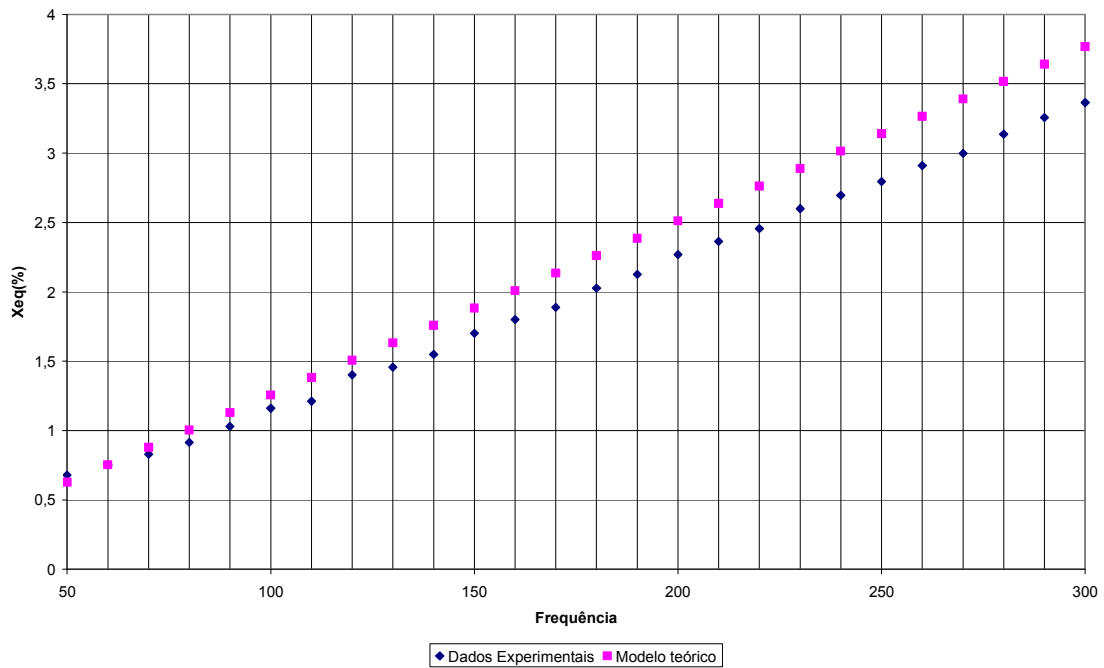


Figura 4.22 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_{eq}$  obtidos para o transformador de 3 kVA.



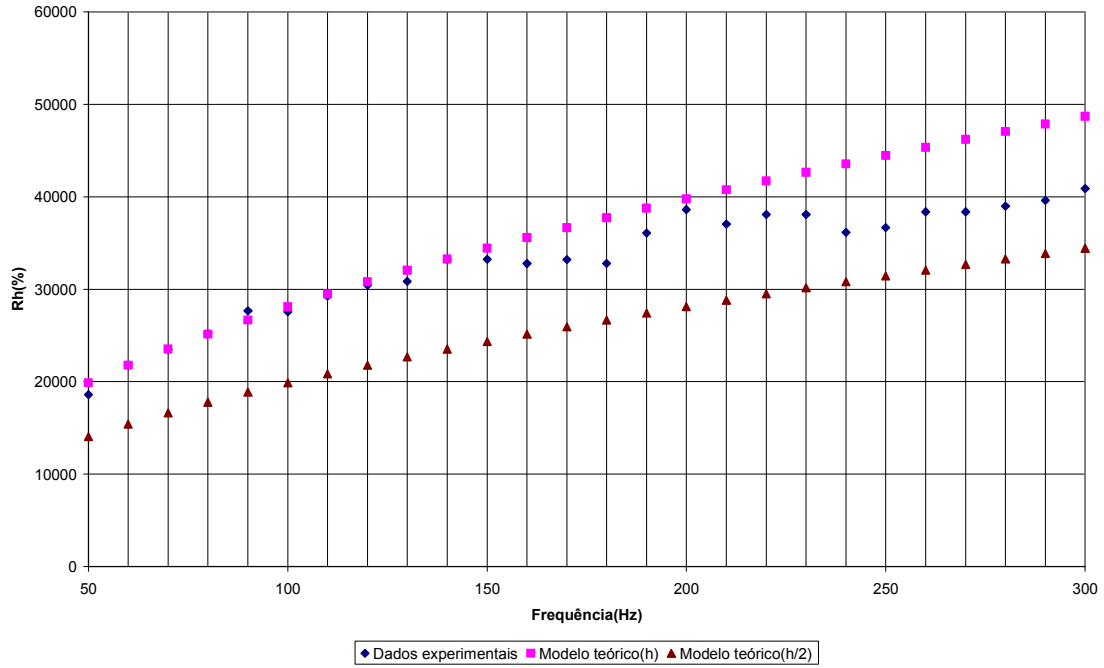


Figura 4.23 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_h$  obtidos para o transformador de 3 kVA.

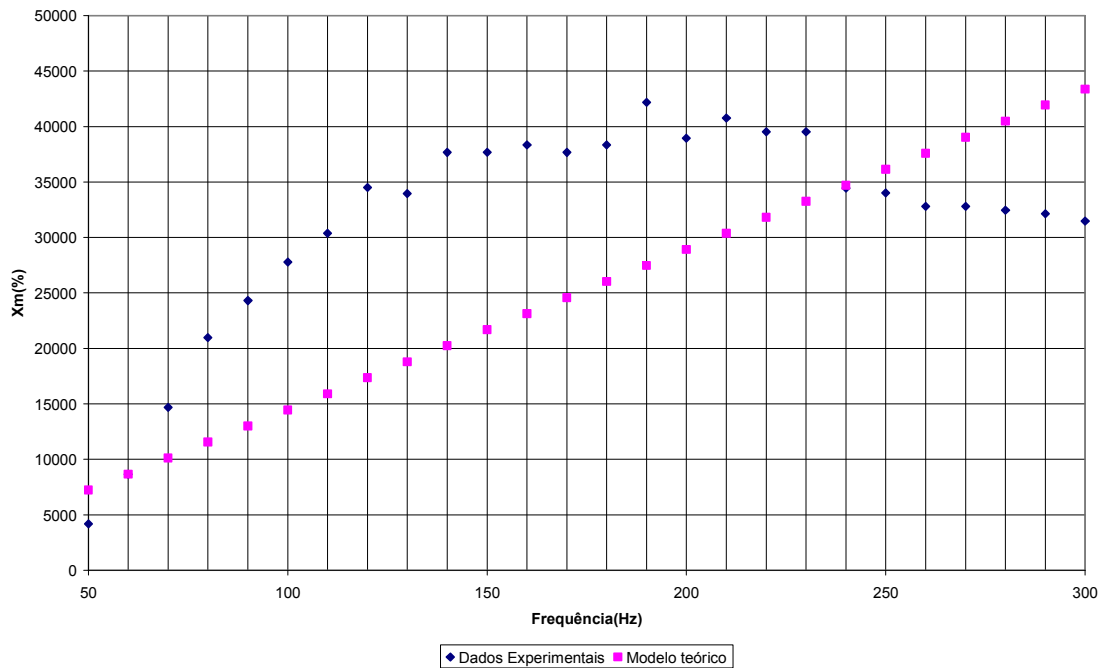


Figura 4.24 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_m$  obtidos para o transformador de 3 kVA.

Através de análise gráfica para o transformador de 3 kVA percebe-se que para o parâmetro que representa perdas nos enrolamentos  $R_{eq}$ , ocorre uma proximidade dos

dados experimentais com o modelo clássico até a frequência de 150 Hz, uma faixa maior do que a do transformador de 1 kVA.

No caso do parâmetro que modela a dispersão do fluxo magnético nos enrolamentos,  $X_{eq}$ , percebe-se uma grande semelhança entre as curvas teórica e experimental, com pequena margem de diferença. Houve maior aderência entre o modelo teórico e os dados experimentais para o transformador de 3 kVA do que para o transformador de 1 kVA.

Para o parâmetro que representa as perdas no núcleo,  $R_h$ , os dados experimentais se encontram na grande maioria das vezes entre os valores das curvas teóricas.

No caso do parâmetro que modela a dispersão do fluxo de magnetização,  $X_m$ , não existe semelhança alguma entre a curva dos dados experimentais com os dados teóricos, assim como no transformador de 1 kVA.

No caso do transformador de 5 kVA, iremos comparar o modelo teórico convencional com os dados gerados pelos polinômios de Meister (2006). Esse fato acontece sem perda de generalidade visto que os dados calculados pelos polinômios de Meister tem erro menor do que 10% quando comparado aos seus dados experimentais. A Tabela 4.9 mostra os parâmetros de modelagem já calculados por intermédio das relações 4.1 3.16 e 3.17 e os dados provindos dos polinômios apresentados nas equações 2.10 a 2.13. As Figuras 4.25 a 4.28 mostram as curvas relativas aos parâmetros  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$ ,  $R_h$  e  $X_m$  do transformador de 5 kVA, respectivamente.

Tabela 4.9 – Tabela comparativa entre os dados polinomiais e o modelo convencional para o transformador de 5 kVA.

Frequência	Modelo Teórico (h)		Modelo Teórico (h/2)		Modelo Teórico		Dados polinomiais			
	$R_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$X_m$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$R_h$ (pu)	$X_m$ (pu)
50	2,9	26117,43	2,05	18467,81	1,12	12189,6	3,01	1,31	26160,38	4707,23
60	3,17	28610,21	2,24	20230,48	1,34	14627,6	3,17	1,34	28610,21	14627,6
70	3,43	30902,56	2,42	21851,41	1,57	17065,5	3,32	1,39	30926,72	22975,7
80	3,66	33036,23	2,59	23360,14	1,79	19503,4	3,44	1,46	33109,89	29859
90	3,89	35040,21	2,75	24777,17	2,02	21941,3	3,56	1,54	35159,72	35384,8
100	4,1	36935,63	2,9	26117,43	2,24	24379,3	3,65	1,64	37076,23	39660,1
110	4,3	38738,41	3,04	27392,19	2,46	26817,2	3,74	1,74	38859,4	42792,5
120	4,49	40460,95	3,17	28610,21	2,69	29255,1	3,81	1,86	40509,23	44889,1
130	4,67	42113,09	3,3	29778,45	2,91	31693	3,87	2	42025,74	46057,2
140	4,85	43702,82	3,43	30902,56	3,14	34131	3,92	2,14	43408,91	46404,1
150	5,02	45236,72	3,55	31987,19	3,36	36568,9	3,97	2,28	44658,74	46037
160	5,18	46720,28	3,66	33036,23	3,58	39006,8	4,01	2,44	45775,25	45063,3
170	5,34	48158,16	3,78	34052,96	3,81	41444,8	4,04	2,6	46758,42	43590,3
180	5,49	49554,34	3,89	35040,21	4,03	43882,7	4,06	2,76	47608,25	41725,1
190	5,64	50912,25	3,99	36000,39	4,26	46320,6	4,09	2,93	48324,75	39575,1
200	5,79	52234,86	4,1	36935,63	4,48	48758,5	4,11	3,09	48907,92	37247,6
210	5,93	53524,81	4,2	37847,75	4,7	51196,5	4,13	3,26	49357,76	34849,8
220	6,07	54784,39	4,3	38738,41	4,93	53634,4	4,14	3,43	49674,26	32489
230	6,21	56015,65	4,39	39609,05	5,15	56072,3	4,17	3,59	49857,43	30272,5
240	6,34	57220,43	4,49	40460,95	5,38	58510,2	4,19	3,75	49907,27	28307,5
250	6,48	58400,35	4,58	41295,28	5,6	60948,2	4,22	3,9	49823,77	26701,4
260	6,6	59556,91	4,67	42113,09	5,82	63386,1	4,25	4,04	49606,94	25561,4
270	6,73	60691,43	4,76	42915,32	6,05	65824	4,29	4,18	49256,78	24994,8
280	6,85	61805,12	4,85	43702,82	6,27	68261,9	4,33	4,31	48773,28	25108,9
290	6,97	62899,1	4,93	44476,38	6,5	70699,9	4,39	4,42	48156,45	26010,9
300	7,09	63974,38	5,02	45236,72	6,72	73137,8	4,45	4,53	47406,29	27808,2

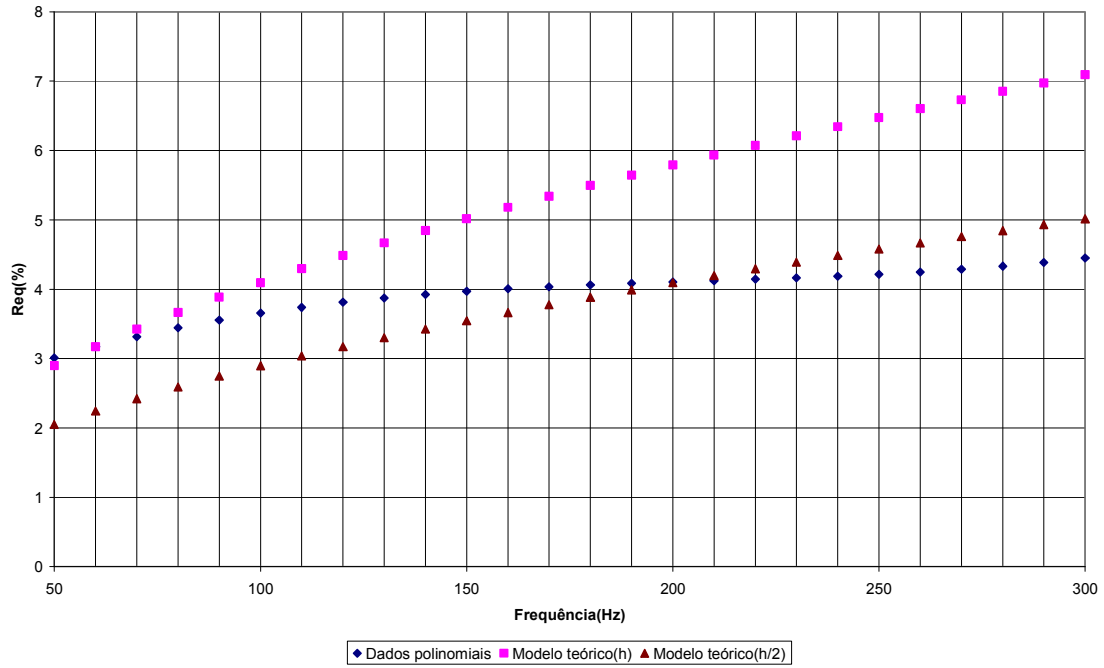


Figura 4.25 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_{eq}$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

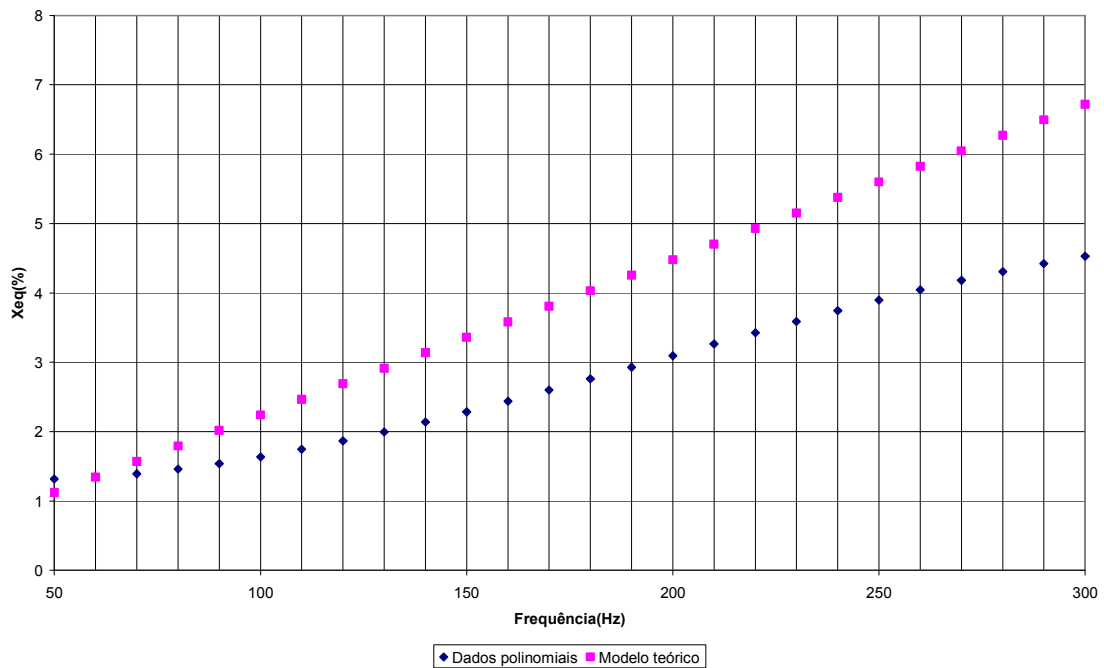


Figura 4.26 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_{eq}$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

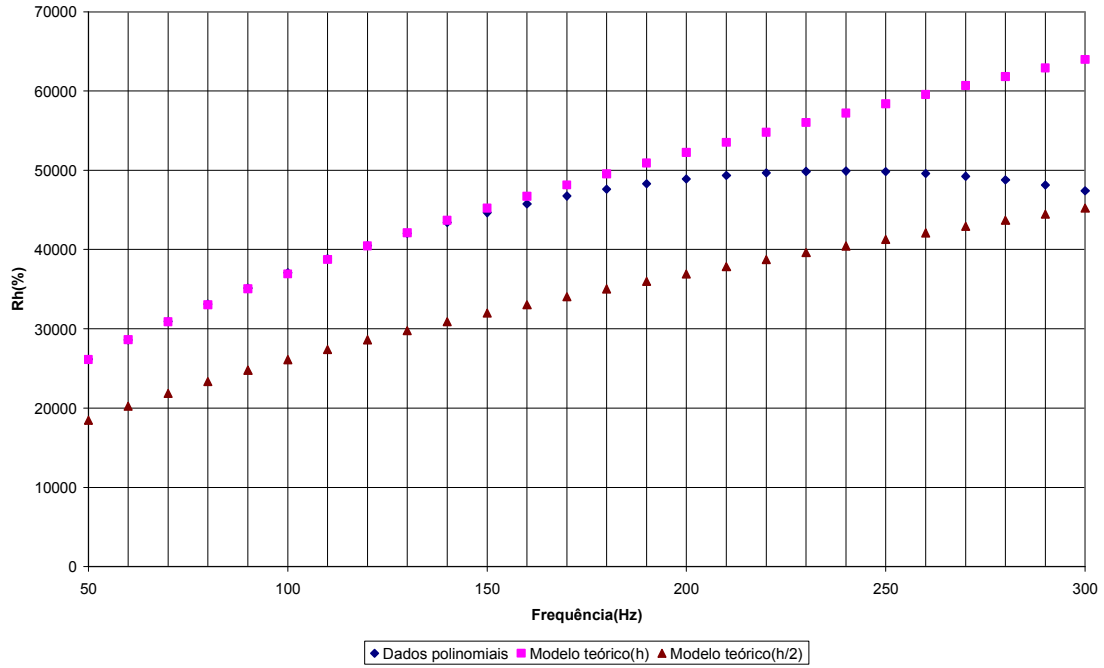


Figura 4.27 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $R_h$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

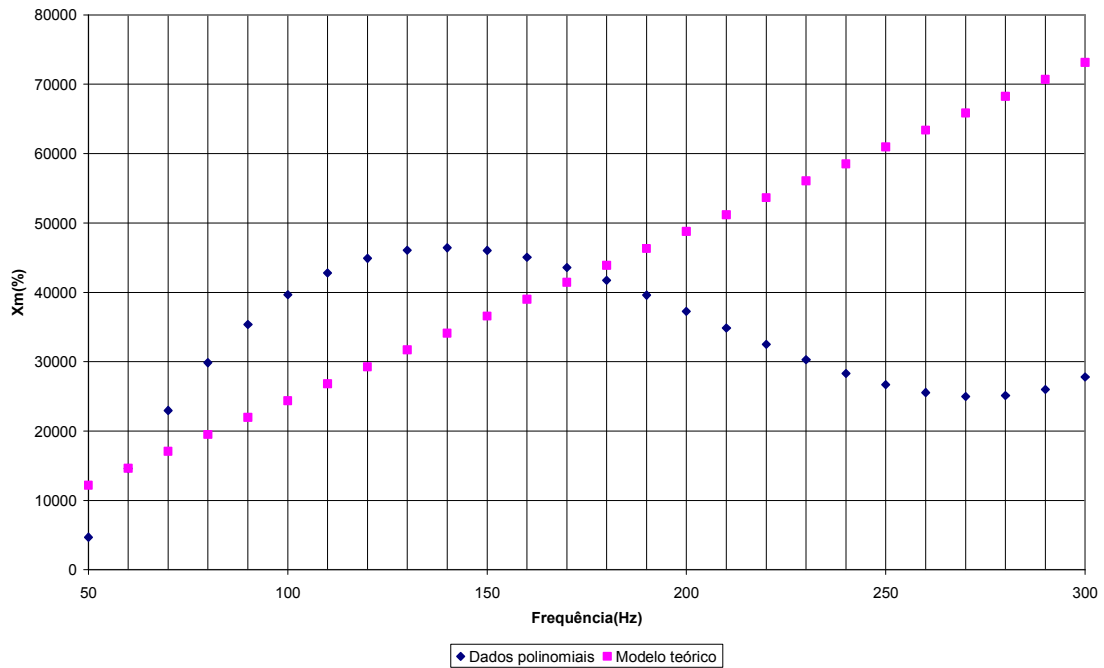


Figura 4.28 – Diagrama de dispersão relativo à comparação dos parâmetros  $X_m$  obtidos para o transformador de 5 kVA.

Através de análise gráfica para o transformador de 5 kVA percebe-se que para o parâmetro que representa perdas nos enrolamentos  $R_{eq}$ , os dados obtidos através de polinômio referente permanecem no intervalo previsto pelos modelos teóricos até a frequência de 210 Hz, essa proximidade com o modelo teórico é maior para o transformador de 5 kVA do que para o de 3 e de 1 kVA.

No caso do parâmetro que modela a dispersão do fluxo magnético nos enrolamentos,  $X_{eq}$ , percebe-se a linearidade da curva obtida através de polinômio, no entanto quanto maior a frequência, maior a diferença entre os valores.

Para o parâmetro que representa as perdas no núcleo,  $R_h$ , os dados obtidos através de polinômio se situam dentro das curvas teóricas, ou seja, no intervalo previsto.

No caso do parâmetro que modela a dispersão do fluxo de magnetização,  $X_m$ , não existe semelhança alguma entre a curva dos dados experimentais com os dados teóricos, assim como nos transformadores de 1 e de 3 kVA.

#### **4.5 Comparação com os Polinômios de Meister (2006)**

De acordo com o item 3.5.2, nesta seção é feita uma comparação com os parâmetros obtidos através dos polinômios 2.10 a 2.13. Esta seção é de vital importância nessa monografia.

Os polinômios obtidos por Meister (2006) em sua dissertação tem duas características bastante importantes. São polinômios em função exclusivamente da frequência e resultam em parâmetros em p.u.. Esperava-se desses fatos que para transformadores de menor porte, porém, da mesma linha de produtos fabricados com a mesma tecnologia, inclusive sendo feitos pela mesma empresa, esses polinômios seriam aplicáveis, visto que estes resultam em parâmetros em p.u. como dito anteriormente. Portanto, esta seção trata basicamente de uma avaliação da possibilidade de generalização dos polinômios para transformadores de uma mesma classe.

#### 4.5.1 Polinômios e frequência normalizada

Os polinômios obtidos por Meister (2006) em seu trabalho serão repetidos aqui de modo a facilitar o entendimento desta seção. Os polinômios são os seguintes:

$$P_{R.eq}(f_n) = 4,05 + 0,20f_n - 0,12f_n^2 + 0,09f_n^3 \quad (\text{equação 2.10})$$

$$P_{X.eq}(f_n) = 2,68 + 1,25f_n + 0,09f_n^2 - 0,10f_n^3 \quad (\text{equação 2.11})$$

$$P_{Rh}(f_n) = 4,72 + 0,65f_n - 0,39f_n^2 \quad (\text{equação 2.12})$$

$$P_{Xm}(f_n) = 4,27 - 1,43f_n - 0,99f_n^2 + 0,80f_n^3 \quad (\text{equação 2.13})$$

Lembrando que esses polinômios resultam em seus respectivos parâmetros em p.u. e  $f_n$  é a frequência normalizada através da seguinte equação:

$$f_n = \frac{f - \text{mean}(f)}{\text{std}(f)} \quad (\text{equação 4.2})$$

$f$  : frequência original;

$\text{mean}(f)$  : média do vetor de frequências , para este caso  $\text{mean}(f) = 175$  ;

$\text{std}(f)$  : desvio padrão associado ao vetor de frequências, para este caso  $\text{std}(f) = 76,48$  .

Faz-se aqui uma explanação a respeito da utilização da frequência normalizada nestes polinômios. Quando matrizes são utilizadas para cálculos de sistemas lineares, a acurácia da solução pode ser comprometida pelo fato de se trabalhar com grandes matrizes repletas de números grandes. A normalização utilizada por Meister (2006) em seu trabalho foi centralizar as frequências em torno de 175 Hz, através da equação 4.2. Dessa maneira foi possível se obter mais acurácia no cálculo dos termos dos polinômios.

#### 4.5.2 Comparação dos parâmetros dos transformadores de 1 e 3kVA

Para o parâmetro  $R_{eq}$  obtido por meio de ensaio em curto-circuito para os dois transformadores, pode-se visualizar nas Tabelas 4.7 e 4.8 uma comparação entre os valores obtidos através da equação 2.10 e o erro associado entre esses valores para os transformadores de 1 kVA e 3 kVA respectivamente.

Tabela 4.10 – Comparativo entre  $R_{eq}$  obtido através de ensaio e  $R_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1kVA.

Frequência	$f_n$	$R_{eq}(f)$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	3,0097	5,9932	49,7811
60	-1,5035	3,1720	5,9932	47,0727
70	-1,3728	3,3164	6,0457	45,1444
80	-1,2420	3,4440	6,0812	43,3665
90	-1,1113	3,5560	6,0812	41,5248
100	-0,9805	3,6536	6,1508	40,5994
110	-0,8498	3,7381	6,1777	39,4904
120	-0,7190	3,8106	6,2102	38,6390
130	-0,5883	3,8724	6,2783	38,3202
140	-0,4576	3,9247	6,2136	36,8366
150	-0,3268	3,9686	6,3077	37,0828
160	-0,1961	4,0054	6,3077	36,4991
170	-0,0653	4,0363	6,3352	36,2865
180	0,0653	4,0625	6,2968	35,4818
190	0,1961	4,0852	6,3330	35,4930
200	0,3268	4,1056	6,3607	35,4523
210	0,4576	4,1250	6,3842	35,3876
220	0,5883	4,1444	6,4754	35,9974
230	0,7190	4,1652	6,4058	34,9774
240	0,8498	4,1880	6,4338	34,8982
250	0,9805	4,2159	6,4254	34,3922
260	1,1113	4,2475	6,5146	34,7998
270	1,2420	4,2857	6,5313	34,3820
280	1,3728	4,3312	6,5313	33,6851
290	1,5035	4,3853	6,4444	31,9511
300	1,6343	4,4492	6,4725	31,2599



Tabela 4.11 – Comparativo entre  $R_{eq}$  obtido através de ensaio e  $R_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3kVA.

Frequência	$f_n$	$R_{eq}(f)$ (pu)	$R_{eq}$ (pu)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	3,0097	2,5525	17,9112
60	-1,5035	3,1720	2,5727	23,2943
70	-1,3728	3,3164	2,6001	27,5492
80	-1,2420	3,4440	2,6358	30,6581
90	-1,1113	3,5560	2,6423	34,5760
100	-0,9805	3,6536	2,6559	37,5639
110	-0,8498	3,7381	2,7058	38,1520
120	-0,7190	3,8106	2,7051	40,8672
130	-0,5883	3,8724	2,7499	40,8202
140	-0,4576	3,9247	2,7799	41,1792
150	-0,3268	3,9686	2,7801	42,7504
160	-0,1961	4,0054	2,8029	42,9029
170	-0,0653	4,0363	2,8326	42,4943
180	0,0653	4,0625	2,8263	43,7405
190	0,1961	4,0852	2,8404	43,8250
200	0,3268	4,1056	2,8212	45,5295
210	0,4576	4,1250	2,8486	44,8079
220	0,5883	4,1444	2,8791	43,9490
230	0,7190	4,1652	2,8525	46,0160
240	0,8498	4,1885	2,8793	45,4673
250	0,9805	4,2155	2,9062	45,0506
260	1,1113	4,2475	2,9106	45,9349
270	1,2420	4,2857	2,9456	45,4937
280	1,3728	4,3312	2,9193	48,3649
290	1,5035	4,3853	2,9346	49,4310
300	1,6343	4,4492	2,9384	51,4111

Na Figura 4.29 pode-se visualizar os dados obtidos em ensaio de ambos transformadores confrontados com os dados obtidos através da equação 2.10 para o parâmetro  $R_{eq}$ , relativo à perda nos enrolamentos por efeito Joule.

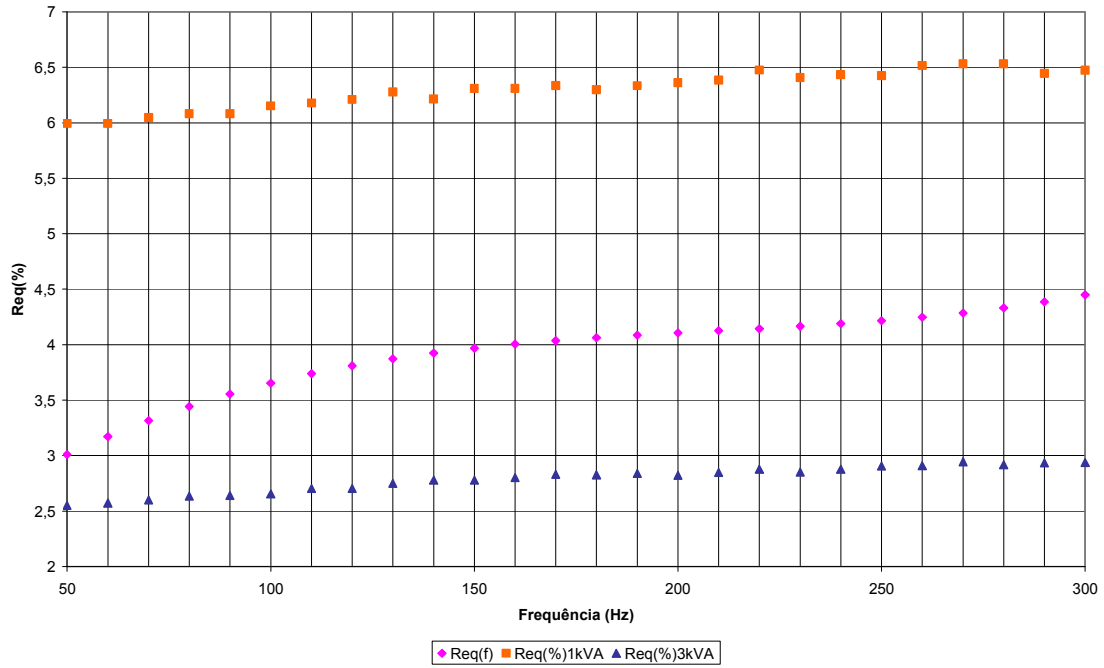


Figura 4.29 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $R_{eq}$  obtido em ensaio e  $R_{eq}(f)$  obtido através de polinômio.

As diferença dos dados observados na Figura 4.29 podem ser melhor visualizadas nas Figuras 4.30 e 4.31, que representam graficamente as diferenças entre  $R_{eq}$  obtidos através de ensaios e  $R_{eq}(f)$ .

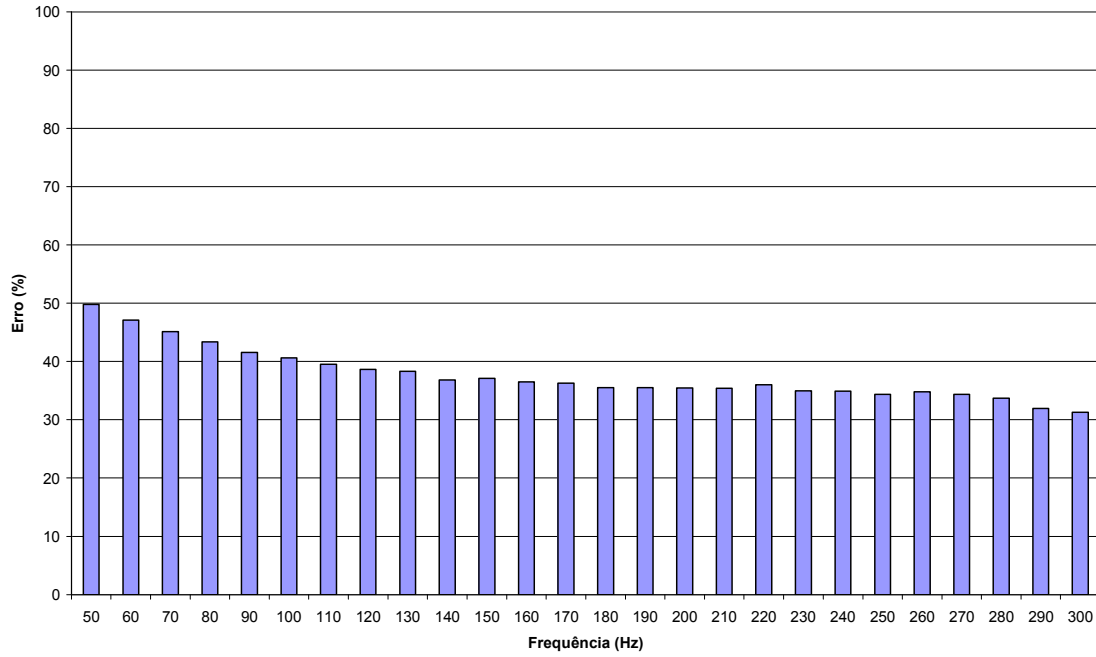


Figura 4.30 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_{eq}$  e  $R_{eq}(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

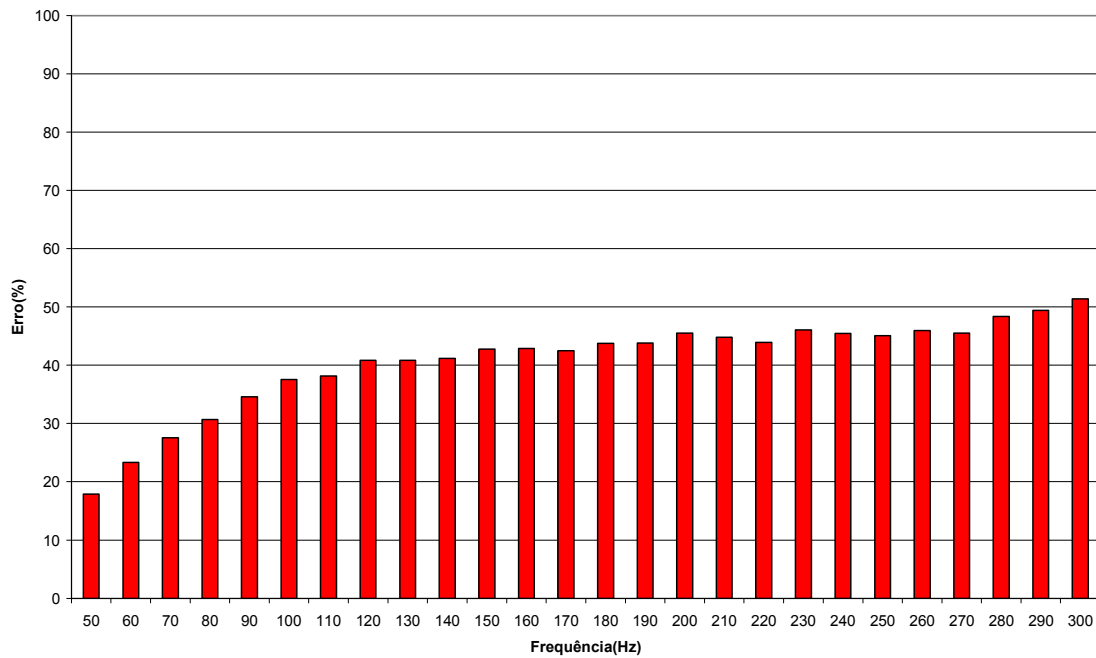


Figura 4.31 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_{eq}$  e  $R_{eq}(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.

Por meio de análise do diagrama da Figura 4.29 percebe-se que o resultado deu diferente do esperado. O esperado seria de que a curva de  $R_{eq}$  para o transformador de 3 kVA estivesse entre as curvas obtidas através do polinômio e a curva de  $R_{eq}$  para o transformador de 1 kVA.

Por intermédio de análise da Figura 4.30 percebe-se que para o transformador de 1 kVA na frequência de operação nominal de 60 Hz, o erro é de aproximadamente 47%, ao passo que para a 5ª harmônica 300 Hz o erro é de aproximadamente 31%. Tal fato é bastante conflitante com o resultado obtido para o transformador de 3 kVA, que tem erro de 23% na frequência nominal de 60 Hz e para 300 Hz tem erro de 51% aproximadamente.

Para o parâmetro  $X_{eq}$ , relativo ao fluxo dos enrolamentos, obtido também a partir dos ensaios em curto-circuito, podemos visualizar na Tabela 4.12 e 4.13 a comparação com o parâmetro  $X_{eq}(f)$ , obtido através da equação 2.11, para os transformadores de 1 e de 3 kVA respectivamente.

Tabela 4.12 – Comparativo entre  $X_{eq}$  obtido através de ensaio e  $X_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1 kVA.

Frequência	$f_n$	$X_{eq}(f)$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	1,3140	0,8272	58,8349
60	-1,5035	1,3439	1,0585	26,9611
70	-1,3728	1,3923	0,9017	54,4026
80	-1,2420	1,4578	1,1993	21,5599
90	-1,1113	1,5392	1,4140	8,8520
100	-0,9805	1,6350	1,2184	34,1988
110	-0,8498	1,7440	1,3552	28,6863
120	-0,7190	1,8648	1,3754	35,5773
130	-0,5883	1,9960	1,3785	44,7911
140	-0,4576	2,1364	1,7813	19,9307
150	-0,3268	2,2845	1,6772	36,2074

160	-0,1961	2,4390	1,8764	29,9809
170	-0,0653	2,5986	1,9868	30,7936
180	0,0653	2,7620	2,2090	25,0349
190	0,1961	2,9278	2,3378	25,2393
200	0,3268	3,0946	2,4087	28,4779
210	0,4576	3,2612	2,5102	29,9167
220	0,5883	3,4262	2,4489	39,9072
230	0,7190	3,5882	2,7988	28,2031
240	0,8498	3,7459	2,7612	35,6604
250	0,9805	3,8979	2,9423	32,4766
260	1,1113	4,0430	2,9853	35,4295
270	1,2420	4,1798	3,0881	35,3479
280	1,3728	4,3069	3,2328	33,2220
290	1,5035	4,4230	3,4361	28,7183
300	1,6343	4,5267	3,5125	28,8742

Tabela 4.13 – Comparativo entre  $X_{eq}$  obtido através de ensaio e  $X_{eq}(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3 kVA.

Frequência	$f_n$	$X_{eq}(f)$ (pu)	$X_{eq}$ (pu)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	1,3140	0,6791	93,4698
60	-1,5035	1,3439	0,7534	78,3638
70	-1,3728	1,3923	0,8289	67,9540
80	-1,2420	1,4578	0,9149	59,3362
90	-1,1113	1,5392	1,0297	49,4756
100	-0,9805	1,6350	1,1601	40,9445
110	-0,8498	1,7440	1,2110	44,0161
120	-0,7190	1,8648	1,4002	33,1845
130	-0,5883	1,9960	1,4563	37,0606
140	-0,4576	2,1364	1,5480	38,0074
150	-0,3268	2,2845	1,7007	34,3272
160	-0,1961	2,4390	1,8008	35,4376
170	-0,0653	2,5986	1,8886	37,5939
180	0,0653	2,7620	2,0264	36,3012
190	0,1961	2,9278	2,1258	37,7259
200	0,3268	3,0946	2,2691	36,3786
210	0,4576	3,2612	2,3633	37,9931

220	0,5883	3,4262	2,4553	39,5420
230	0,7190	3,5882	2,5998	38,0156
240	0,8498	3,7459	2,6950	38,9918
250	0,9805	3,8979	2,7955	39,4326
260	1,1113	4,0430	2,9098	38,9457
270	1,2420	4,1798	2,9987	39,3846
280	1,3728	4,3069	3,1373	37,2768
290	1,5035	4,4230	3,2564	35,8209
300	1,6343	4,5267	3,3643	34,5519

Na Figura 4.32 pode-se visualizar um diagrama confrontando os dados das Tabelas 4.12 e 4.13 relativos ao parâmetro  $X_{eq}$  dos transformadores de 1 e de 3 kVA e  $X_{eq}(f)$ , que é o parâmetro relativo ao fluxo de dispersão dos enrolamentos obtido através de polinômio.

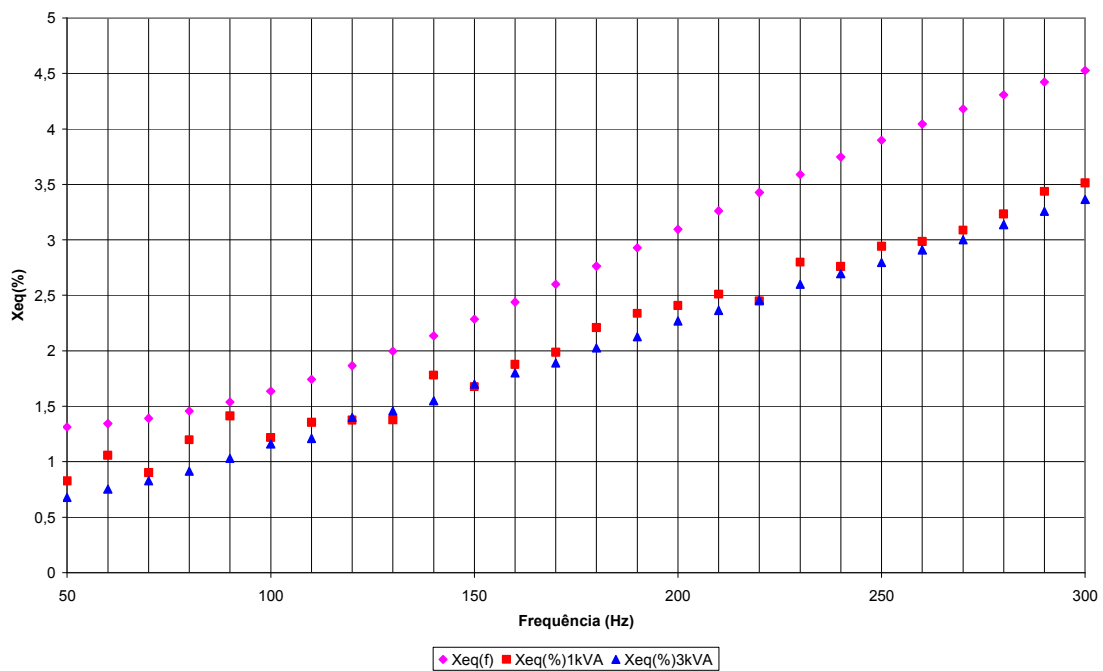


Figura 4.32 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $X_{eq}$  obtido em ensaio e  $X_{eq}(f)$  através de polinômio.

A diferença entre  $X_{eq}$  e  $X_{eq}(f)$  de ambos transformadores pode ser melhor visualizada através dos gráficos associados ao erro percentual entre essas medidas apresentados nas Figuras 4.33 e 4.34.

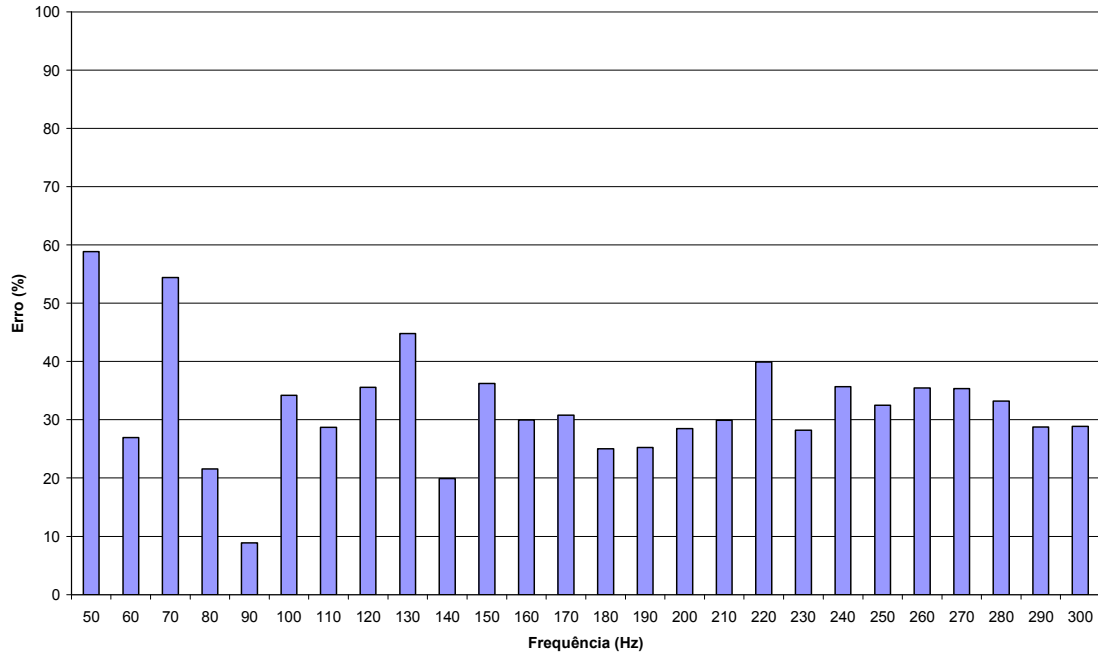


Figura 4.33 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_{eq}$  e  $X_{eq}(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

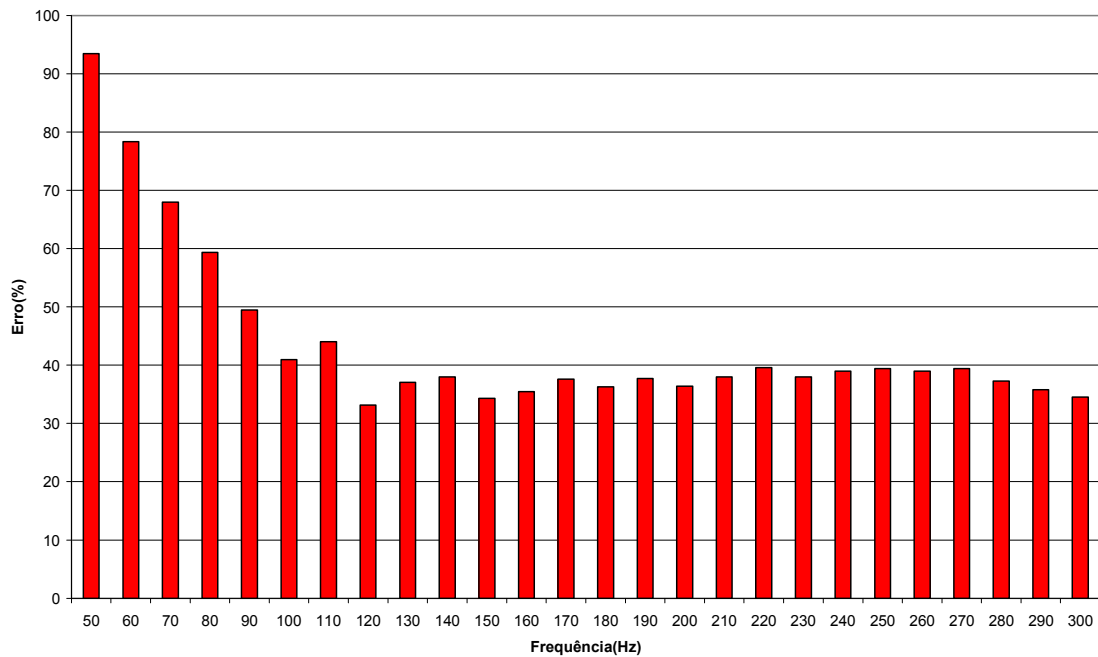


Figura 4.34 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_{eq}$  e  $X_{eq}(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.

O diagrama apresentado na Figura 4.33 nos mostra curvas com tendências semelhantes, guardadas as proporções devido a erros experimentais. No entanto, é notável uma maior aproximação da curva de  $X_{eq}(f)$  com a curva do parâmetro  $X_{eq}$  do transformador de 1 kVA.

Através da análise do gráfico que consta na Figura 4.33, percebe-se que o erro percentual para o transformador de 1 kVA ficou na maioria das vezes abaixo de 40 %. Na frequência nominal de operação 60 Hz, o erro ficou em aproximadamente 28% , percebe-se também que não há um padrão para o erro em função da frequência, há uma grande variação principalmente nas frequências baixas.

Através da análise do gráfico da Figura 4.34, relativo ao transformador de 3 kVA, constata-se que o erro para as 5 primeiras frequências, 50 a 100 Hz, ficam praticamente acima de 50 % e no restante do espaço amostral o erro se comporta de maneira praticamente constante, variando de 32 a 44%. O comportamento do transformador de 3 kVA se mostra diferente do de 1 kVA em relação ao parâmetro  $X_{eq}(f)$  estabelecido por Meister (2006).

Nesse ponto é possível uma reflexão a respeito dos efeitos ocorridos nos enrolamentos dos transformadores. O parâmetro referente às perdas nos enrolamentos,  $R_{eq}$ , variou bastante do transformador de 1 kVA para o de 3 kVA, como pode ser visto na Figura 4.29, ao passo que o parâmetro que modela a dispersão do fluxo nos enrolamentos,  $X_{eq}$ , variou menos, sendo que as curvas dos parâmetros obtidos experimentalmente para ambos transformadores, no caso de  $X_{eq}$  ficaram próximas entre si. Uma sugestão de explicação seria a de que a mudança na bitola dos enrolamentos do transformador de 1 kVA para 3 kVA influencia fortemente no valor da resistência modelada, ao passo que a indução tem em sua essência uma grande influência do material do núcleo e como o enrolamento é feito ao redor deste.

Para o parâmetro  $R_h$ , relativo às perdas no núcleo, obtido através do ensaio em vazio, demonstra-se nas Tabelas 4.14 e 4.15 uma comparação entre os parâmetros dos transformadores de 1 e de 3 kVA e o parâmetro  $R_h(f)$ , obtido através da equação 2.12.



Observa-se que o valor original de  $R_h(f)$  foi multiplicado por  $10^4$  devido à utilização desse fator por Meister (2006) de modo a simplificar o entendimento gráfico de seus polinômios.

Tabela 4.14 – Comparativo entre  $R_h$  obtido através de ensaio e  $R_h(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1 kVA.

Frequência	$f_n$	$R_h(f) * 10^4$ (pu)	$R_h$ (pu)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	26160,3	13387,2	95,413
60	-1,5035	28610,2	15913,4	79,786
70	-1,3728	30926,7	17953,6	72,259
80	-1,2420	33109,8	18727,6	76,796
90	-1,1113	35159,7	18960,0	85,441
100	-0,9805	37076,2	20318,0	82,479
110	-0,8498	38859,3	20318,0	91,255
120	-0,7190	40509,2	20638,6	96,278
130	-0,5883	42025,7	24080,6	74,520
140	-0,4576	43408,9	22988,1	88,831
150	-0,3268	44658,7	23706,5	88,381
160	-0,1961	45775,2	24870,1	84,056
170	-0,0653	46758,4	23339,6	100,330
180	0,0653	47608,2	24078,4	97,721
190	0,1961	48324,7	24480,1	97,403
200	0,3268	48907,9	29376,1	66,488
210	0,4576	49357,7	24888,2	98,317
220	0,5883	49674,2	24486,8	102,860
230	0,7190	49857,4	25729,5	93,774
240	0,8498	49907,2	26632,3	87,397
250	0,9805	49823,7	24497,9	103,379
260	1,1113	49606,9	25314,5	95,962
270	1,2420	49256,7	26637,1	84,917
280	1,3728	48773,2	26649,2	83,019
290	1,5035	48156,4	26649,2	80,704
300	1,6343	47406,2	26192,1	80,994

Tabela 4.15 – Comparativo entre  $R_h$  obtido através de ensaio e  $R_h(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3 kVA.

Frequência	$f_n$	$R_h(f) * 10^4$ (pu)	$R_h$ (pu)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	26160,3	18589,5	40,726
60	-1,5035	28610,2	21779,8	31,363
70	-1,3728	30926,7	23497,8	31,615
80	-1,2420	33109,8	25173,2	31,527
90	-1,1113	35159,7	27670,1	27,067
100	-0,9805	37076,2	27563,8	34,510
110	-0,8498	38859,3	29274,5	32,741
120	-0,7190	40509,2	30437,2	33,091
130	-0,5883	42025,7	30859,7	36,183
140	-0,4576	43408,9	33219,3	30,673
150	-0,3268	44658,7	33225,3	34,411
160	-0,1961	45775,2	32773,2	39,672
170	-0,0653	46758,4	33216,2	40,769
180	0,0653	47608,2	32782,2	45,225
190	0,1961	48324,7	36063,7	33,998
200	0,3268	48907,9	38620,9	26,635
210	0,4576	49357,7	37051,8	33,212
220	0,5883	49674,2	38094,8	30,396
230	0,7190	49857,4	38091,4	30,888
240	0,8498	49907,2	36130,8	38,129
250	0,9805	49823,7	36675,5	35,850
260	1,1113	49606,9	38364,7	29,303
270	1,2420	49256,7	38364,7	28,390
280	1,3728	48773,2	38974,8	25,140
290	1,5035	48156,4	39600,6	21,605
300	1,6343	47406,2	40891,6	15,931

Na Figura 4.35 as diferenças entre os parâmetros  $R_h$  dos transformadores e  $R_h(f)$  podem ser visualizadas. O parâmetro  $R_h$  é associado à perdas no núcleo dos transformadores. As diferenças entre  $R_h$  e  $R_h(f)$  ao longo do intervalo de frequências

podem ser visualizadas em gráficos de erros percentuais nas Figuras 4.36 e 4.37, para ambos os transformadores.

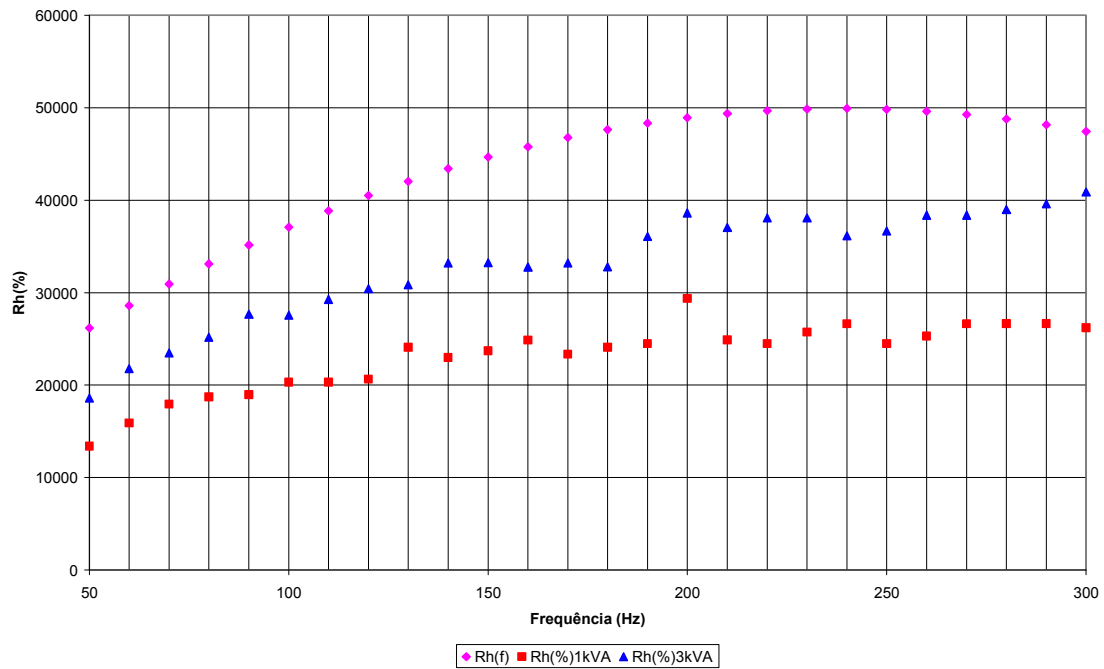


Figura 4.35 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $R_h$  obtido em ensaio e  $R_h(f)$  através de polinômio.

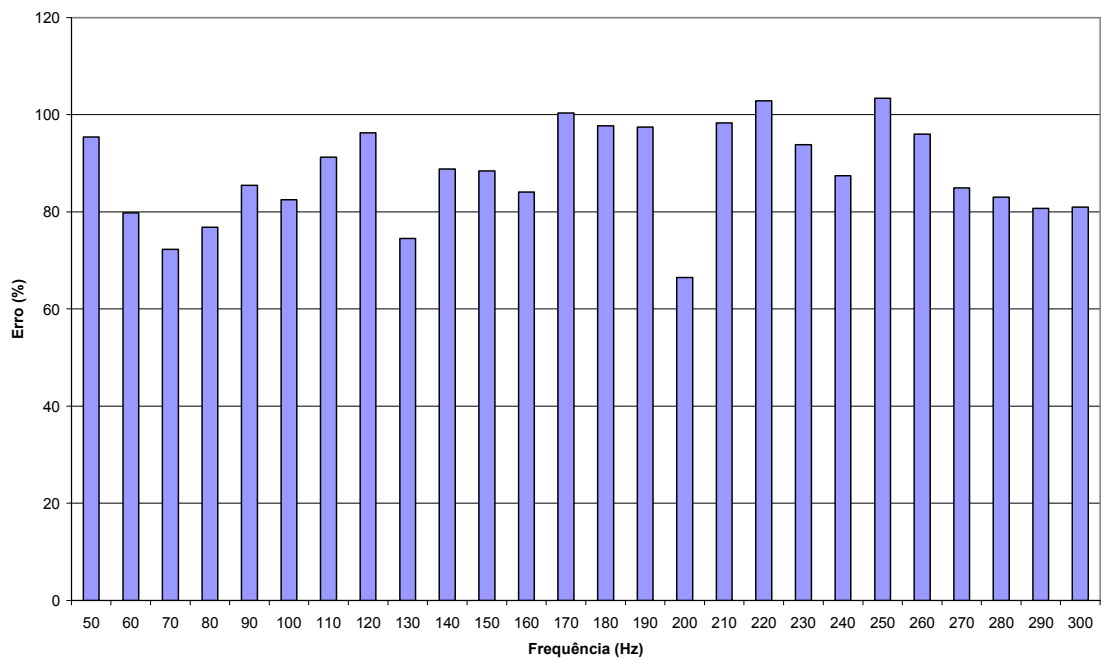


Figura 4.36 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_h$  e  $R_h(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

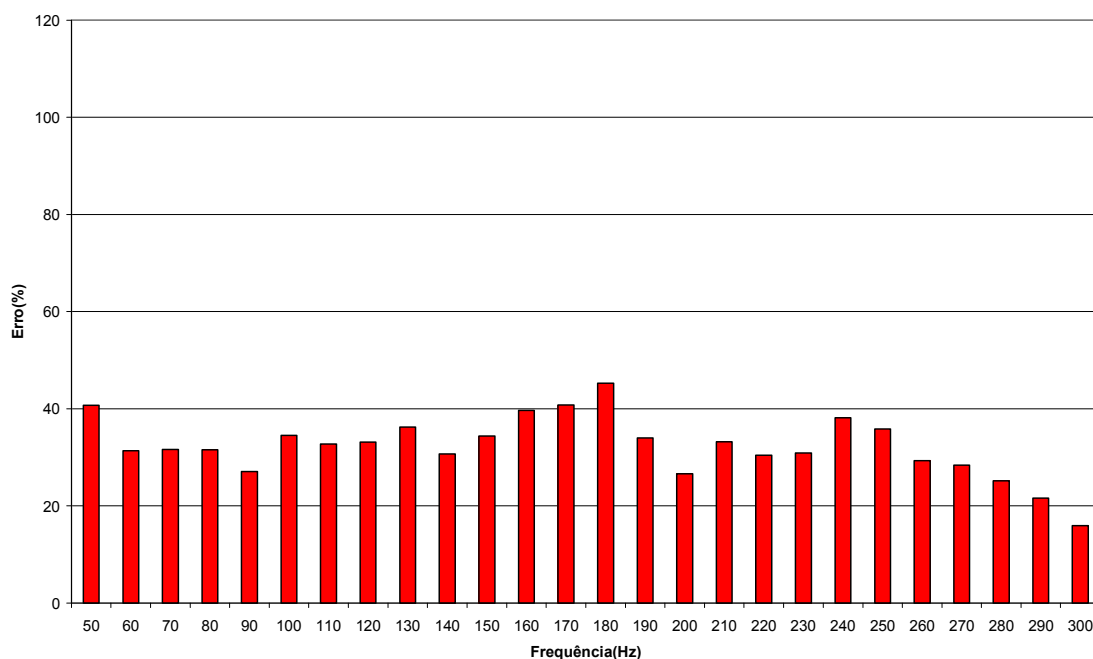


Figura 4.37 – Gráfico de erros percentuais entre  $R_h$  e  $R_h(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.

O diagrama apresentado na Figura 4.35 mostra um resultado esperado. O transformador de 3 kVA tem mais perdas no núcleo do que o transformador de 1 kVA e obviamente menos perdas do que o transformador de 5 kVA. Tal resultado é mais perceptível por meio de análise dos gráficos de erros.

Através de uma breve análise do gráfico apresentado na Figura 4.36, percebemos que para o transformador de 1kVA, o erro permaneceu sempre acima de 60%, chegando a ultrapassar 100% durante o intervalo de frequências, com uma variação sem padrão. Para a frequência de 60 Hz, esse erro foi de aproximadamente 80%.

Para o transformador de 3 kVA, através da análise da Figura 4.37, percebe-se que a grande maioria dos erros ficou abaixo de 40%, porém não se obteve nenhum padrão de erro.

Para o parâmetro  $X_m$ , associado ao fluxo de magnetização do núcleo, obtido através do ensaio em vazio, demonstra-se nas Tabelas 4.16 e 4.17 o parâmetro  $X_m(f)$

obtido através da equação 2.13 e os erros associados às comparações com os transformadores de 1 e 3 kVA, respectivamente. Observa-se que o valor original de  $X_m(f)$  foi multiplicado por  $10^4$  devido à utilização desse fator por Meister (2006) de modo a simplificar o entendimento gráfico de seus polinômios .

Tabela 4.16 – Comparativo entre  $X_m$  obtido através de ensaio e  $X_m(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 1 kVA.

Frequência	$f_n$	$X_m(f) * 10^4$ (%)	$X_m$ (%)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	4707,2	1345,4	249,85
60	-1,5035	14627,5	3588,8	307,57
70	-1,3728	22975,7	7604,0	202,15
80	-1,2420	29859,0	12015,4	148,50
90	-1,1113	35384,7	14220,0	148,83
100	-0,9805	39660,1	16923,4	134,35
110	-0,8498	42792,4	16923,4	152,85
120	-0,7190	44889,0	16742,7	168,11
130	-0,5883	46057,1	19535,0	135,76
140	-0,4576	46404,0	20195,4	129,77
150	-0,3268	46037,0	19745,7	133,14
160	-0,1961	45063,3	19145,3	135,37
170	-0,0653	43590,2	19963,3	118,35
180	0,0653	41725,1	19533,2	113,61
190	0,1961	39575,1	19344,4	104,58
200	0,3268	37247,5	23213,3	60,45
210	0,4576	34849,7	19159,2	81,89
220	0,5883	32488,9	19349,7	67,90
230	0,7190	30272,4	18801,5	61,01
240	0,8498	28307,5	18475,6	53,21
250	0,9805	26701,3	19358,4	37,92
260	1,1113	25561,4	18985,8	34,63
270	1,2420	24994,8	18479,0	35,26
280	1,3728	25108,8	18487,4	35,81
290	1,5035	26010,9	18487,4	40,69
300	1,6343	27808,1	18648,6	49,11

Tabela 4.17 – Comparativo entre  $X_m$  obtido através de ensaio e  $X_m(f)$  obtido através de polinômio. Transformador de 3 kVA.

Frequência	$f_n$	$X_m(f) * 10^4$ (%)	$X_m$ (%)	$\varepsilon_{\%}$ (%)
50	-1,6343	4707,2	4192,4	12,279
60	-1,5035	14627,5	8673,9	68,637
70	-1,3728	22975,7	14686,1	56,444
80	-1,2420	29859,0	20967,4	42,406
90	-1,1113	35384,7	24308,7	45,563
100	-0,9805	39660,1	27790,8	42,709
110	-0,8498	42792,4	30372,3	40,892
120	-0,7190	44889,0	34512,5	30,065
130	-0,5883	46057,1	33951,7	35,654
140	-0,4576	46404,0	37667,1	23,195
150	-0,3268	46037,0	37673,9	22,198
160	-0,1961	45063,3	38324,0	17,584
170	-0,0653	43590,2	37663,7	15,735
180	0,0653	41725,1	38334,5	8,844
190	0,1961	39575,1	42171,7	6,157
200	0,3268	37247,5	38938,9	4,343
210	0,4576	34849,7	40764,3	14,509
220	0,5883	32488,9	39523,5	17,798
230	0,7190	30272,4	39519,9	23,399
240	0,8498	28307,5	34443,1	17,813
250	0,9805	26701,3	34013,8	21,498
260	1,1113	25561,4	32814,8	22,104
270	1,2420	24994,8	32814,8	23,830
280	1,3728	25108,8	32463,1	22,654
290	1,5035	26010,9	32125,3	19,033
300	1,6343	27808,1	31478,8	11,660

A Figura 4.38 mostra o diagrama de dispersão de  $X_m(f)$  e  $X_m$  de ambos transformadores, parâmetro que representa a dispersão do fluxo no núcleo.

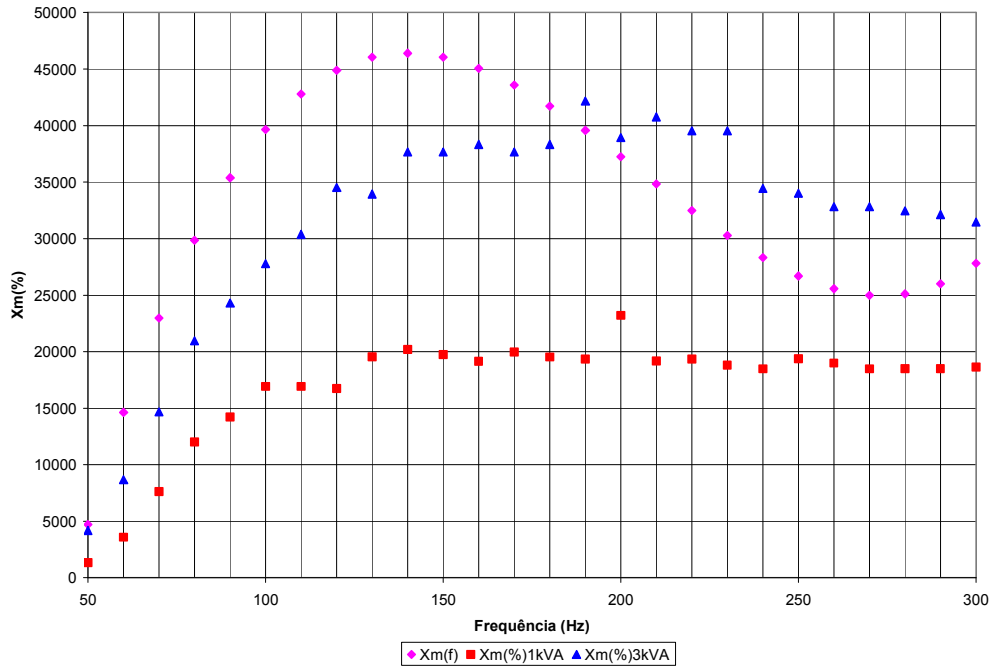


Figura 4.38 – Diagrama de dispersão confrontando o parâmetro  $X_m$  obtido em ensaio e  $X_m(f)$  através de polinômio.

A diferença entre  $X_m$  e  $X_m(f)$  para ambos os transformadores pode ser melhor visualizada através dos gráficos de barras associados aos erros percentuais entre essas medidas apresentadas nas Figura 4.39 e 4.40.

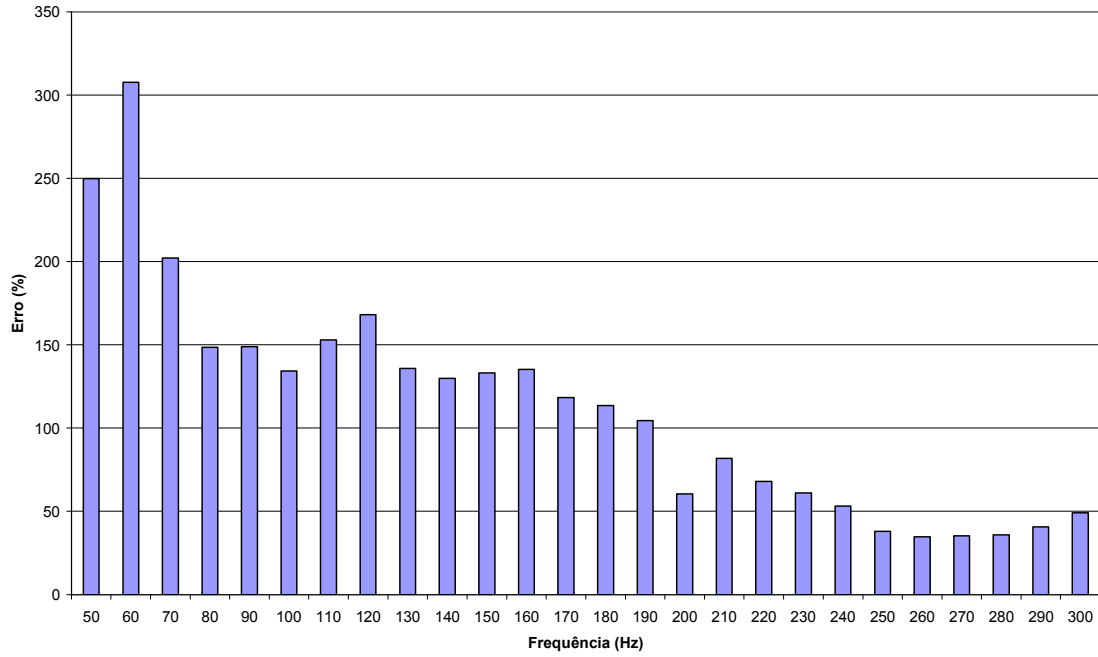


Figura 4.39 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_m$  e  $X_m(f)$  para o transformador de 1 kVA em função da frequência.

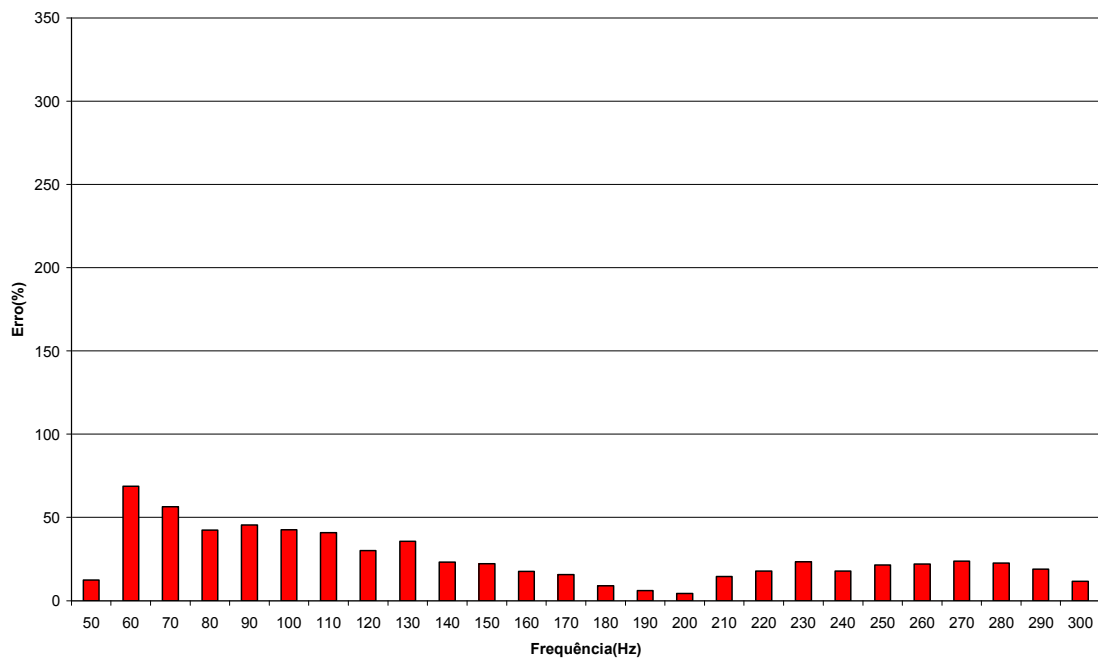


Figura 4.40 – Gráfico de erros percentuais entre  $X_m$  e  $X_m(f)$  para o transformador de 3 kVA em função da frequência.



Através da análise do gráfico associado aos erros percentuais entre  $X_m$  e  $X_m(f)$  percebemos que para o transformador de 1 kVA, o erro tem uma grande variação ao longo do intervalo amostral. Varia desde 307% para 60 Hz até 34% para 260 Hz.

Para o transformador de 3 kVA, o erro também tem uma variação considerável mas se encontra em uma faixa menor, que varia de 4% a aproximadamente 68%. As curvas relativas aos parâmetros  $X_m$  diferem bastante quanto a forma .

Seguindo procedimento descrito no item 3.5.2, com intuito de aprofundar a análise, é interessante se fazer uma inspeção mais detalhada da variação dos erros em determinadas frequências (harmônicas) e observar seu desvio ao longo do espectro de frequências amostral. A Tabela 4.18 resume os erros associados a todos os parâmetros em determinadas frequências para o transformador de 1 kVA e a Tabela 4.19 resume para o transformador de 3 kVA.

Tabela 4.18 – Erros associados ( $\varepsilon_{\%}$  (%)) aos parâmetros de modelagem nas frequências harmônicas. Transformador de 1 kVA.

Parâmetros	Frequências harmônicas				
	60 Hz	120 Hz	180 Hz	240 Hz	300 Hz
$R_{eq}$	47,07	38,63	35,48	34,89	31,26
$X_{eq}$	26,96	35,57	25,03	35,66	28,87
$R_h$	79,78	96,27	97,72	87,39	80,99
$X_m$	307,57	168,11	113,61	53,21	49,11

Tabela 4.19 – Erros associados ( $\varepsilon_{\%}$  (%)) aos parâmetros de modelagem nas frequências harmônicas. Transformador de 3 kVA.

Parâmetros	Frequências harmônicas				
	60 Hz	120 Hz	180 Hz	240 Hz	300 Hz
$R_{eq}$	23,29	40,86	43,74	45,46	51,41
$X_{eq}$	78,36	33,18	36,30	38,99	34,55
$R_h$	31,36	33,09	45,22	38,12	15,93
$X_m$	68,63	30,06	8,84	17,81	11,66

Para obter uma análise de mais fácil compreensão foram criados gráficos de barras representando as Tabelas 4.18 e 4.19. Esse gráficos estão dispostos nas Figuras 4.41 e 4.42.

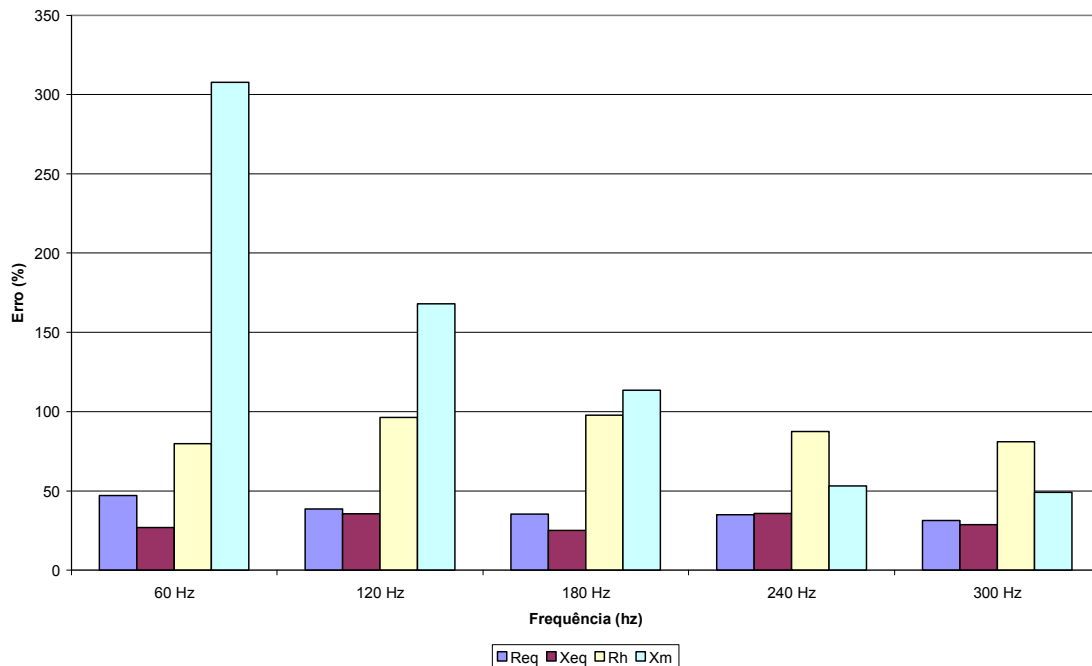


Figura 4.41 – Gráfico de barras associado aos erros dos parâmetros que modelam o transformador de 1 kVA.

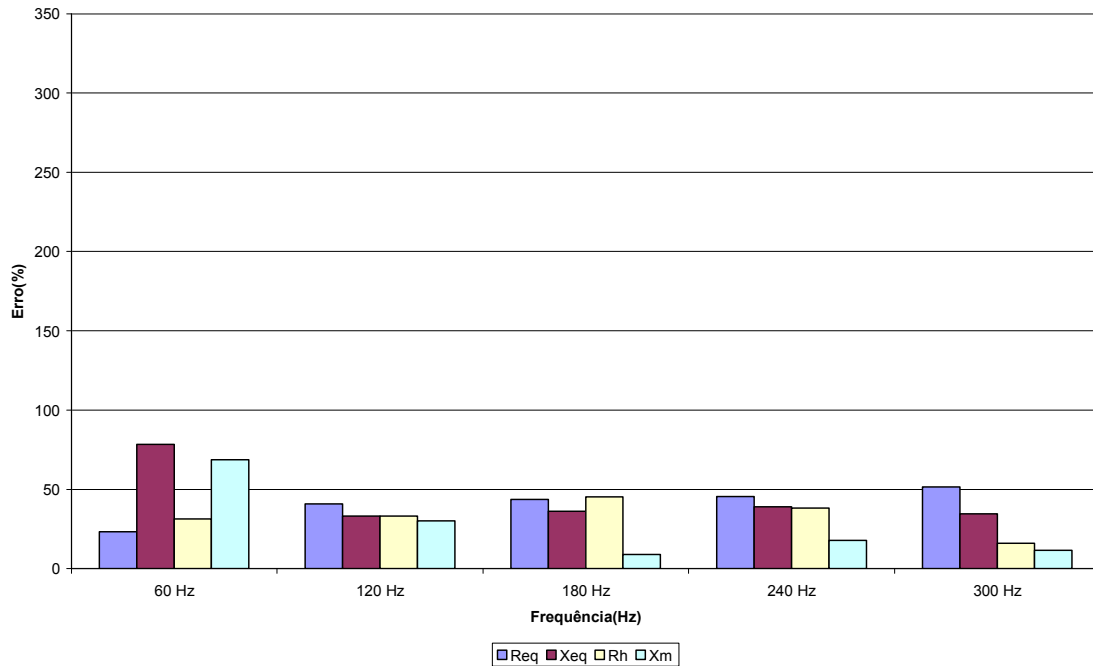


Figura 4.42 – Gráfico de barras associado aos erros dos parâmetros que modelam o transformador de 3 kVA.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 4.41, para o transformador de 1 kVA percebe-se que  $R_{eq}$  tem ao longo das frequências definidas uma diminuição do erro percentual, no entanto, o erro continua sendo maior do que 50%. Percebe-se que para  $X_{eq}$  não existe um padrão de diminuição de erro, no entanto o erro é consideravelmente menor do que os outros parâmetros.  $R_h$  tem um padrão de erro bastante alto, em torno de 87%, porém com um desvio relativamente pequeno. A indutância de magnetização  $X_m$  segue a mesma tendência de  $R_{eq}$ , que é a de diminuição progressiva do erro, no entanto tem um índice bastante alto.

Para o transformador de 3 kVA, tem-se que o erro associado ao parâmetro  $R_{eq}$  aumenta, no entanto é em grande parte das vezes menor do que o erro associado a  $R_{eq}$  do transformador de 1 kVA. Para o parâmetro  $X_{eq}$ , existe uma grande discrepância relativa a frequência de 60 Hz, enquanto nas outras frequências o erro se mantém relativamente constante, sendo o erro associado à este parâmetro maior no transformador de 3 kVA. O parâmetro  $R_h$  do transformador de 3 kVA manteve a

tendência de desvio do parâmetro  $R_h$  do transformador de 1 kVA, no entanto reduziu praticamente a 1/3 seu erro. O parâmetro  $X_m$  do transformador de 3kVA reduziu drasticamente o erro percentual, no entanto não segue o padrão de erros do transformador de 1 kVA.

Devido ao fato da análise feita anteriormente ficar contida somente nas frequências harmônicas, realiza-se um novo tratamento estatístico dos dados relativos aos erros em função da frequência, como previsto no item 3.5.2 de modo a se obter mais argumentos para uma conclusão satisfatória. A Tabela 4.20 mostra a média e o desvio padrão dos erros ao longo do espectro amostral para cada parâmetro para o transformador de 1 kVA e a Tabela 4.21 reproduz tal fato para o transformador de 3 kVA.

Tabela 4.20 – Tabela da média e desvio padrão dos erros ao longo do espectro de amostras para o transformador de 1kVA.

Parâmetros	Média	Desvio padrão
$R_{eq}$	37,64	4,52
$X_{eq}$	32,20	9,99
$R_h$	88,02	9,80
$X_m$	113,10	69,02

De posse da Tabela 4.20 percebe-se que a média mais baixa de erros é de  $X_{eq}$ , no entanto é um índice relativamente alto, pois se trata de aproximadamente um erro de 32%. O menor desvio padrão é o do parâmetro  $R_{eq}$ , aproximadamente 4,53 %, no entanto a média do erro é bastante alta ficando na faixa dos 37% aproximadamente.

Tabela 4.21 – Tabela da média e desvio padrão dos erros ao longo do espectro de amostras para o transformador de 3 kVA.

Parâmetros	Média	Desvio padrão
$R_{eq}$	40,75	8,00
$X_{eq}$	43,82	14,73
$R_h$	32,27	6,22
$X_m$	25,65	15,65

Para o transformador de 3 kVA, percebe-se que a média dos erros dos parâmetros fica entre 25 e 44% , e que o desvio padrão tem seu maior nível para o parâmetro  $R_{eq}$ . Comparando ambos transformadores, percebe-se que não é possível estabelecer nenhum padrão de erro.

## 4.6 Conclusões

No presente capítulo foram calculados os parâmetros do circuito equivalente dos transformadores de 1 e de 3 kVA. Para o transformador de 1 kVA ficou evidente que:

- O parâmetro  $R_{eq}$ , que modela as perdas nos enrolamentos do transformador, é não-linear e cresce conforme a frequência aumenta. Tal fato condiz com a potência de curto-circuito medida, confirmando assim o modelo equivalente utilizado para perdas nos enrolamentos.

- O parâmetro  $X_{eq}$ , que modela o fluxo de dispersão nos enrolamentos do transformador, tem uma característica aproximadamente linear. Tal fato evidenciou a característica aproximadamente constante para a indutância dos enrolamentos.

- O parâmetro  $R_h$ , que modela as perdas no núcleo do transformador, é claramente não-linear e como esperado tende a aumentar com a frequência.

- O parâmetro  $X_m$ , que modela o fluxo de magnetização do núcleo, é não-linear e cresce até a frequência de aproximadamente 120 Hz, após essa frequência,  $X_m$  se mantém relativamente constante. A impedância equivalente modelada do núcleo do transformador é dominada pelo parâmetro  $X_m$  devido à associação em paralelo e o menor valor de  $X_m$  quando comparada ao parâmetro  $R_h$ .

Para o transformador de 3 kVA ficou evidente que:

- O parâmetro  $R_{eq}$ , que modela as perdas nos enrolamentos do transformador, é não-linear e cresce conforme a frequência aumenta. Tal modelagem condiz com a potência de curto-circuito medida, confirmando assim o modelo equivalente utilizado para perdas nos enrolamentos. Salienta-se aqui que o diagrama relativo à potência de curto-circuito não está em p.u..

- O parâmetro  $X_{eq}$ , que modela o fluxo de dispersão nos enrolamentos do transformador, tem uma característica bastante linear. Tal fato evidenciou a característica aproximadamente constante para a indutância dos enrolamentos.

- O parâmetro  $R_h$ , que modela as perdas no núcleo do transformador, é claramente não-linear e como esperado tende a aumentar com a frequência.

- O parâmetro  $X_m$ , que modela o fluxo de magnetização do núcleo, é não-linear e cresce até a frequência de aproximadamente 180 Hz. A impedância equivalente modelada do núcleo do transformador é dominada pelo parâmetro  $X_m$  devido à associação em paralelo e seu menor valor quando comparada ao parâmetro  $R_h$ .

Quando comparado ao modelo teórico convencional observaram-se os seguintes fatos:

- Em relação ao parâmetro  $R_{eq}$ , quanto maior a potência do transformador melhor as curvas teóricas se adaptavam aos dados obtidos experimentalmente, no

entanto os dados experimentais ficaram dentro das curvas de resistência teórica no máximo até 210 Hz, melhor caso ocorrido para o transformador de 5 kVA.

- Em relação ao parâmetro  $X_{eq}$ , a reatância de todos os parâmetros se mostrou linear, no entanto o transformador que mais se aproximou do modelo teórico foi o de 3 kVA.

- Em relação ao parâmetro  $R_h$ , todos os dados experimentais ou simulados no caso do transformador de 5 kVA ficaram dentro das curvas teóricas.

- Em relação ao parâmetro  $X_m$ , o modelo teórico se mostrou bastante falho, visto que a curva da reatância de magnetização do núcleo não é linear, fato este comprovado experimentalmente.

O modelo teórico convencional, em relação ao parâmetro que representa perdas no núcleo, apresentou fatos interessantes durante a análise:

- Para frequências mais baixas, a equação  $R(h)$  (equação 3.18) se mostrou mais eficaz.

- Para frequências mais alta, próximas de 300 Hz, a equação  $R(\frac{h}{2})$  (equação 3.19) se mostrou mais eficaz.

As comparações feitas com os parâmetros obtidos através dos polinômios de Meister (2006) foram divididas em três etapas. A primeira comparou e quantificou o valor dos parâmetros experimentais confrontados com o valor resultante obtido através de polinômio respectivo. A segunda etapa utilizou esses erros quantificados na primeira etapa somente nas frequências harmônicas da rede e comparou os erros do transformador de 1 kVA com os erros do transformador de 3 kVA. A terceira etapa consistiu em utilizar a média e o desvio padrão dos erros para o transformador de 1 kVA e de 3 kVA. O método proposto no item 3.5.2 foi seguido perfeitamente.

De posse dos dados à respeito dos erros conclui-se que não existe padrão de erros facilmente identificável e que as médias de erros relativos foram altas dotadas de um nível alto de desvio padrão.



## 5. Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma avaliação a respeito da possibilidade de generalização de um modelo em função da frequência para transformadores. Ao longo dos capítulos foi possível uma reflexão a respeito da situação atual da tecnologia de modelagem de transformadores e das novas demandas da sociedade, em se tratando de qualidade de energia elétrica.

Com base nos dados obtidos nos ensaios e nas reflexões feitas sobre as propostas desta monografia, conclui-se que o atual modelo não prevê com eficiência a não-linearidade da resistência modelada dos enrolamentos quando se trata de variação na frequência, também não prevê a não-linearidade da indutância modelada do núcleo do transformador, fato este agravado pelo conhecimento de longa data da relação não-linear entre a corrente de excitação e fluxo magnético.

O modelo proposto por Meister (2006) mostra-se bastante eficaz quando trata do transformador no qual a modelagem foi baseada. No entanto, a possibilidade de generalização para transformadores construídos de maneira semelhante, porém de potências mais baixas, não existe. As discrepâncias entre os dados obtidos experimentalmente e os dados obtidos através de polinômio são grandes, como mostrado no capítulo anterior. Não se vislumbrou a existência de um fator de correção para essas equações em função da inexistência de um padrão nos erros ocorridos.

No entanto, esta monografia serve, além instrumento de avaliação da possibilidade de generalização do modelo em frequência, como base de dados para uma nova tentativa de criação de um modelo de transformadores em função da frequência mais preciso.

Uma sugestão de linha de pesquisa que utilizaria os dados aqui contidos, seria a de estudar a viabilidade de um modelo polinomial em função da frequência, como o feito por Meister (2006), no entanto inserindo uma constante no polinômio. Essas constantes seriam os parâmetros obtidos na frequência nominal com os tradicionais ensaios em curto-circuito e em vazio. A idéia deste modelo traria como grande

vantagem a possibilidade de criação de um circuito equivalente do transformador na frequência, utilizando fontes facilmente encontradas no mercado, sem grande sofisticação.

Uma outra linha de pesquisa aqui sugerida seria a de analisar outras classe de funções matemáticas diferentes da polinomial.

## Referências Bibliográficas

Abreu, J. P. “Visão geral sobre Qualidade de Energia Elétrica”, ESAF – Escola de Administração Fazendária, Brasília-DF, 2005.

Abreu, J. P., Cogo, J. R., Oliveira, J. C., “Transformadores: teoria e ensaios”, Edgard Blücher LTDA - Escola Federal de Engenharia - EFEI, Itajubá – MG, 1990.

Almeida, W. G., Freitas, F. D., “Circuitos Polifásicos”, Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos – FinaTec, Brasília – DF, 1995.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Beaty, H. W., “*Electrical power systems quality*”, McGraw-Hill, USA, 1996.

Meister, D. (2006). Aplicação do Método dos Mínimos Quadrados na estimação de parâmetros do modelo de um transformador. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-284A/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Nasar, S. A., “Máquinas Elétricas”, McGraw-Hill, São Paulo – SP, 1984.

NBR 5356, “Transformador de potência”, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro - RJ, 1993.

NBR 5380, “Transformador de potência – método de ensaio”, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro - RJ, 1993.

Oliveira, M.”Apostila da disciplina Qualidade de Energia Elétrica”, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2003.

Ramo, S., Whinnery, J. R., Duzer, T. V., “*Fields and Waves in Communication Eleetronics*”, Wiley, USA, 1994.

Sen, P. C., "*Principles of Electric Machines and Power Electronics*", Wiley, USA, 1997.