

**MARCELO SCHULTER**

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS  
NA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES  
A PARTIR DE ENSAIOS**

**FLORIANÓPOLIS**

2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS  
NA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES  
A PARTIR DE ENSAIOS**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**MARCELO SCHULTER**

Florianópolis, julho de 2007.

# **APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES A PARTIR DE ENSAIOS**

Marcelo Schulter

“Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.”

---

Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.  
Orientador

---

Katia Campos de Almeida, Dr.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.  
Presidente

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Co-orientador

---

Eng. Jean Viane Leite, Dr.

---

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

---

Prof. Pedro Armando da Silva Jr., Dr.

Dedico este trabalho à minha família.

## **Agradecimentos**

À minha família: meus pais (João e Marli), meu irmão Alexandre e minha irmã Patrícia, pelo apoio e incentivo.

À minha namorada Luciane pela compreensão.

Aos meus orientadores Walter e Jhoe, pela sugestão do tema abordado neste trabalho e apoio dado durante a realização do mesmo.

Ao doutorando Claudenei Simão e ao mestrando Bruno (Chico) pela disposição e ajuda na realização dos ensaios, e aos demais amigos do GRUCAD.

Aos meus amigos: Anderson Vô, André, Arliones, Bazzo, Bode, Broka, Charles, Darlan, Diego Punk, Eduardo HU, Elisa, Everton Caveira, Fabrício, Flávio, Isabel, Ivan, Jean, Jeremia, João, Júnior, Leonardo, Lucilene, Marcelo, Marconi, Rodrigo Chico, Ronan, Rosi, Susane, Willian e demais colegas não citados.

Ao pessoal do “Trilhas Floripa” e “Mountain Bike Floripa”.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

# **APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA MODELAGEM DE TRANSFORMADORES A PARTIR DE ENSAIOS**

**Marcelo Schulter**

Julho/2007

Orientador: Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.

Co-orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: transformadores; modelagem; Algoritmos Genéticos.

Número de páginas: 87.

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma análise dos procedimentos definidos por normas técnicas para o ensaio de transformadores de potência. O modelo convencional do transformador e seu desempenho são obtidos a partir destes ensaios. É proposto um procedimento para obtenção de um modelo com parâmetros variantes no tempo que leve em consideração os efeitos da perda e saturação magnética do material. Os resultados são obtidos a partir de ensaios realizados em uma bancada com instrumentos adequados para a medida das grandezas elétricas envolvidas. O procedimento emprega uma técnica de otimização chamada Algoritmo Genético. Os resultados experimentais adquiridos com a bancada são comparados aos simulados para validação do modelo. É feita uma investigação do procedimento proposto pela norma para a medida das perdas magnéticas. Os resultados obtidos nos ensaios conforme as normas técnicas são comparados aos adquiridos com a bancada.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS IN TRANSFORMER MODELING BASED ON TESTS**

**Marcelo Schulter**

July/2007

Advisor: Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.

Co-advisor: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Area of concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: transformer; modeling; Genetic Algorithm.

Number of pages: 87.

**ABSTRACT:** This work presents an analysis of the procedures defined by standards for power transformer testing. The transformer's conventional model and its performance are obtained from these tests. A procedure for time-varying model parameter estimation that considers the iron losses and magnetic saturation is proposed. The results are obtained from tests performed in a workbench with adequate instruments for electric measurements. The procedure applies an optimization technique known as Genetic Algorithm. Experimental results obtained from the workbench are compared to simulated ones for evaluating the model. The measuring of magnetic losses as proposed by the standard procedure is investigated. The results from tests performed according to the standards and the results acquired in the workbench are compared.

# Sumário

<b>LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e Objetivos da Pesquisa .....	1
1.2 Organização da Dissertação.....	3
<b>CAPÍTULO 2 – TEORIA ELEMENTAR DO TRANSFORMADOR.....</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução.....	5
2.2 O Modelo Ideal.....	6
2.3 O Modelo Real do Transformador.....	8
2.3.1 Modelagem da Não-Linearidade do Núcleo .....	13
2.4 Conclusão .....	15
<b>CAPÍTULO 3 – NORMAS PARA ENSAIO DE TRANSFORMADORES.....</b>	<b>16</b>
3.1 Introdução.....	16
3.2 Transformadores de Potência: Métodos de Ensaio .....	16
3.2.1 Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos.....	17
3.2.1.1 Considerações sobre o Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos .....	17
3.2.2 Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação .....	18
3.2.2.1 Perdas em Vazio.....	18
3.2.2.2 Corrente de Excitação .....	20
3.2.2.3 Considerações sobre os Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação .....	21
3.2.3 Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito .....	21
3.2.3.1 Perdas em Carga.....	21
3.2.3.2 Impedância de Curto-Circuito.....	23
3.2.3.3 Considerações sobre os Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito .....	25
3.2.4 Regulação.....	25
3.2.5 Rendimento .....	25
3.3. Conclusão .....	26
<b>CAPÍTULO 4 – ALGORITMOS GENÉTICOS .....</b>	<b>28</b>
4.1 Introdução.....	28
4.2 Métodos de Otimização .....	28
4.3 Algoritmos Genéticos .....	30
4.3.1 Seleção .....	33
4.3.2 Cruzamento .....	34
4.3.3 Mutação .....	36
4.3.4 Critérios de Convergência.....	37
4.3.5 Técnicas para Aceleração da Convergência dos AGs .....	38
4.3.6 Exemplos de Otimização Usando AGs .....	39
4.3.6.1 Função com Máximos e Mínimos .....	39
4.3.6.2 Ajuste de Curvas .....	40
4.4 Conclusão .....	45



<b>CAPÍTULO 5 – MODELO COM PARÂMETROS CONSTANTES .....</b>	<b>46</b>
5.1 Introdução .....	46
5.2 Ensaio dos Transformadores Conforme as Normas .....	46
5.2.1 Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos Conforme a NBR 5380 .....	46
5.2.2 Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação Conforme a NBR 5380 .....	48
5.2.3 Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito Conforme a NBR 5380.....	50
5.2.4 Cálculo do Rendimento e da Regulação .....	51
5.3 O Modelo Clássico do Transformador de Potência .....	52
5.4 O Modelo Convencional Modificado .....	54
5.5 Ensaio Empregando Instrumentação Não-Convencional para Modelagem do Núcleo do Transformador .....	56
5.6 Conclusão .....	62
<b>CAPÍTULO 6 – MODELAGEM DAS NÃO-LINEARIDADES DO TRANSFORMADOR E ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ENSAIOS UTILIZANDO INSTRUMENTAÇÃO CONVENCIONAL E NÃO-CONVENCIONAL .....</b>	<b>64</b>
6.1 Introdução .....	64
6.2 Modelagem das Não-Linearidades do Transformador de Potência .....	65
6.2.1 Parâmetros do Modelo dos Enrolamentos .....	65
6.2.2 Resultados dos Ensaios para Estimação dos Parâmetros dos Enrolamentos .....	66
6.2.3 Bancada de Ensaios para Aquisição das Curvas de Tensão e Corrente .....	67
6.2.4 Algoritmo Proposto Para Obtenção dos Parâmetros do Núcleo.....	69
6.2.5 Resultados dos Ensaios com a Bancada e Aplicação do Algoritmo Proposto na Estimação dos Parâmetros do Modelo do Núcleo.....	72
6.3 Análise Comparativa entre Resultados dos Ensaios Utilizando Instrumentação Convencional e Não-Convencional .....	77
6.4 Conclusão .....	78
<b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO A – TRANSFORMADORES ENSAIADOS E INSTRUMENTOS CONVENCIONAIS UTILIZADOS .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>

## Lista de Siglas, Símbolos e Abreviaturas

$\alpha$	Coeficiente de multiplicação	
$\alpha_{pol}$	Coeficiente de multiplicação polarizado	
$\Delta t$	Intervalo de tempo entre dois pontos das curvas	[s]
$\Delta t'$	Intervalo de tempo de uma iteração do algoritmo	[s]
$\lambda$	Enlace de fluxo	[Wb·e]
$\omega$	Frequência angular	[rad/s]
$A$	Conjunto de aptidões	
$ABNT$	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
$AG$	Algoritmo Genético	
$CA$	Corrente alternada	
$CC$	Corrente contínua	
$dir$	Indicador de direção para o cruzamento	
$E$	Função objetivo	
$E_z$	Tensão de curto-circuito	[V]
$F$	Função objetivo	
$F_c$	Fator de forma	
$f_{med}$	Aptidão média da população	
$f_{max}$	Aptidão do melhor indivíduo	
$I$	Conjunto de indivíduos (população)	
$I'$	Subconjunto de $I$	
$I_\varphi$	Corrente de excitação	[A]
$I_1$	Corrente do enrolamento primário	[A]
$I_2$	Corrente do enrolamento secundário	[A]
$I_{AG}$	Curva de corrente simulada pelo AG	[A]
$I_{EXP}$	Curva de corrente obtida em ensaio	[A]
$I_{Lm}$	Corrente na indutância de magnetização $L_m$	[A]
$I_n$	Corrente nominal do enrolamento sob tensão	[A]
$I_{Rf}$	Corrente na resistência de perdas $R_f$	[A]
$k_{cruz}$	Posição do ponto de corte para o cruzamento	
$k_f$	Constante	

$k_{mut}$	Posição do ponto de corte para a mutação	
$k_t$	Constante	
$L$	Indutância de curto-circuito	[H]
$L_{d1}$	Indutância de dispersão do enrolamento primário	[H]
$L_{d2}$	Indutância de dispersão do enrolamento secundário	[H]
$L_m$	Indutância de magnetização	[H]
$m_{dg}$	Medida da diversidade genética	
$N$	Número de pontos das curvas de tensão e/ou corrente	
$N$	Rendimento	[%]
$n_{final}$	Número de iterações do algoritmo	
$n_{pop}$	Número de indivíduos da população	
$n_{var}$	Número de variáveis	
$passo$	Número de pontos correspondente a um intervalo de tempo $\Delta t'$	
$p_{cruz}$	Probabilidade de cruzamento	
$p_{mut}$	Probabilidade de mutação	
$P_{Rf}$	Potência ativa dissipada em $R_f$	[W]
$R$	Componente resistiva de $Z$	[ $\Omega$ ]
$R'$	Componente resistiva de $Z$ na temperatura $t_2$	[ $\Omega$ ]
$R_1$	Resistência do enrolamento primário	[ $\Omega$ ]
$R_2$	Resistência do enrolamento secundário	[ $\Omega$ ]
$Reg$	Regulação	[%]
$R_f$	Resistência de perdas no ferro	[ $\Omega$ ]
$RGA$	<i>Replacement Genetic Algorithm</i>	
$R_t$	Resistência do enrolamento medida na temperatura $t_1$	[ $\Omega$ ]
$R'_t$	Resistência do enrolamento calculada na temperatura $t_2$	[ $\Omega$ ]
$SGA$	<i>Simple Genetic Algorithm</i>	
$S_n$	Potência aparente nominal do enrolamento	[VA]
$SSGA$	<i>Steady State Genetic Algorithm</i>	
$t_1$	Temperatura de ensaio, igual a temperatura do meio circundante	[ $^{\circ}$ C]
$t_2$	Temperatura de referência	[ $^{\circ}$ C]
$TSE$	Transformador sob ensaio	
$V_0$	Tensão no enrolamento secundário do TSE	[V]
$V_1$	Voltímetro de valor eficaz	

$V_2$	Voltímetro de valor médio	
$V_{ef}$	Valor eficaz da tensão de alimentação	[V]
$V_{EXP}$	Curva de tensão obtida em ensaio	[V]
$V_{med}$	Valor médio retificado de um período da tensão de alimentação	[V]
$V_n$	Tensão nominal do enrolamento	[V]
$W$	Perdas totais	[W]
$W_0$	Potência absorvida pelos instrumentos de medição	[W]
$W_I$	Potência aparente absorvida pelo transformador	[W]
$W_A$	Perdas adicionais	[W]
$W'_A$	Perdas adicionais na temperatura $t_2$	[W]
$W_e$	Perdas por excesso, relativas à $W_m$	
$W_E$	Potência absorvida pelo transformador	[W]
$W'_E$	Perdas em carga na temperatura $t_2$	[W]
$W_S$	Perdas em vazio para tensão senoidal	[W]
$W_f$	Perdas por correntes de Foucault, relativas à $W_m$	
$W_h$	Perdas por histerese, relativas à $W_m$	
$W_m$	Perdas em vazio medidas	[W]
$W_R$	Perdas ôhmicas dos enrolamentos	[W]
$W'_R$	Perdas ôhmicas dos enrolamentos na temperatura $t_2$	[W]
$X$	Componente reativa de $Z$	[ $\Omega$ ]
$X_{d1}$	Reatância de dispersão do enrolamento primário	[ $\Omega$ ]
$X_{d2}$	Reatância de dispersão do enrolamento secundário	[ $\Omega$ ]
$X_m$	Reatância de magnetização do núcleo	[ $\Omega$ ]
$Z$	Impedância de curto-circuito	[ $\Omega$ ]
$Z_{CA}$	Impedância equivalente em circuito aberto	[ $\Omega$ ]
$Z_{CC}$	Impedância equivalente em curto-circuito	[ $\Omega$ ]
$Z_{CA\_AG}$	Impedância equivalente em circuito aberto estimada pelo AG	[ $\Omega$ ]
$Z_{CC\_AG}$	Impedância equivalente em curto-circuito estimada pelo AG	[ $\Omega$ ]
$Z'$	Impedância de curto-circuito na temperatura $t_2$	[ $\Omega$ ]

# Capítulo 1

## Introdução

O transformador elétrico é um dispositivo que transfere energia entre circuitos elétricos por meio de um acoplamento magnético. A norma técnica ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5458 [1] define transformador de potência como o equipamento cuja finalidade principal é transformar energia elétrica entre partes de um sistema de potência. Desde o século XIX, este equipamento tem um papel importante, pois permite a transmissão de energia elétrica de forma econômica.

Os fabricantes de transformadores apresentam em catálogos [2] os resultados de ensaios realizados conforme normas técnicas. Características como rendimento e regulação refletem na qualidade do equipamento, de modo que é importante conhecer os procedimentos para a obtenção destes parâmetros, analisando a forma mais adequada para isso.

### 1.1 Motivação e Objetivos da Pesquisa

Os ensaios para determinação de parâmetros e desempenho dos transformadores de potência são estabelecidos por normas técnicas, as quais descrevem os procedimentos para estes ensaios. Nestes procedimentos é prescrita a utilização de instrumentos analógicos para a medida das grandezas elétricas envolvidas, como por exemplo, tensão, corrente e potência. Estes ensaios são ditos convencionais, por utilizar instrumentação convencional (voltímetro, amperímetro e wattímetro) para a leitura das grandezas elétricas, e são semelhantes aos ensaios clássicos de obtenção dos parâmetros do modelo do transformador de potência – o ensaio em curto-circuito e em circuito aberto. Apesar de desconsiderar alguns dos efeitos da não-idealidade dos transformadores, estes ensaios oferecem uma forma simples de obtenção do modelo. Alguns autores utilizam estes métodos em seus trabalhos [3-5] como parte do procedimento para obter os modelos.

A norma técnica NBR 5380 [6] abrange uma série de ensaios para determinação de parâmetros e desempenho dos transformadores, entre eles os ensaios para medida das perdas em vazio e em carga, corrente de excitação, impedância de curto-circuito, rendimento, bem como regulação. Um dos objetivos deste trabalho é a análise do método de ensaio proposto pelas normas para a determinação das perdas no núcleo do transformador. Uma vez que o núcleo apresenta o fenômeno de saturação e perdas magnéticas, a corrente de excitação apresenta uma forma de onda distorcida mesmo com uma tensão de alimentação puramente senoidal. Por este motivo, a instrumentação empregada na aquisição destas grandezas elétricas deve levar em consideração estas peculiaridades.

Neste trabalho é proposto um procedimento para a obtenção dos parâmetros e do desempenho de transformadores utilizando uma bancada de ensaios que emprega instrumentação não-convencional para leitura das grandezas elétricas envolvidas. Por instrumentação não-convencional entende-se osciloscópio e a própria bancada, constituída por um inversor de tensão com controle realimentado. Esta bancada [7], originalmente destinada à caracterização de materiais ferromagnéticos, impõe uma forma de onda senoidal de tensão no enrolamento secundário do quadro de Epstein (transformador cujo núcleo contém as amostras de material a serem caracterizadas), o que implica indiretamente numa forma de onda de indução magnética também senoidal no núcleo, condição de referência para a medida de perdas magnéticas.

O principal objetivo deste trabalho pode ser dividido em duas partes: a primeira é a investigação dos métodos de ensaio estabelecidos pelas normas técnicas e comparação dos resultados obtidos por estes métodos com os adquiridos em ensaios utilizando instrumentação não-convencional. Resultados obtidos de forma adequada são importantes para a determinação precisa dos parâmetros do modelo do transformador em regime permanente. Para a obtenção deste modelo, alguns ensaios são essenciais: ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos, ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação, bem como o ensaio de perdas em carga e impedância de curto-circuito, todos estabelecidos pela NBR 5380. A obtenção de resultados por métodos não-convencionais e comparação com os obtidos de forma convencional constitui a principal contribuição deste trabalho.

A investigação dos procedimentos normatizados de caracterização de lâminas de aço ao silício foi realizada por Mendes [8] empregando o quadro de Epstein. Sabe-se que as perdas magnéticas em transformadores são superiores às previstas pelos ensaios usando

este quadro [9]. No presente trabalho serão investigados os procedimentos definidos pelas normas técnicas relacionadas à medida das perdas magnéticas do núcleo dos transformadores.

Como segunda parte do objetivo deste trabalho, pretende-se analisar o modelo do transformador em regime permanente bem como modelos alternativos baseados numa análise qualitativa das não-idealidades envolvidas. Quando consideradas a não-linearidade e as perdas magnéticas do material empregado na construção do núcleo do transformador de potência, este deve ser modelado de forma adequada. Os modelos comumente se baseiam em equações diferenciais, em circuitos elétricos equivalentes e/ou na dualidade elétrica/magnética [3-5,9-12]. Muitos autores representam o comportamento não-linear da magnetização do transformador por meio de uma reatância saturável [11,12] e resistências variantes no tempo para modelar as perdas.

Será proposto um algoritmo para obtenção de um modelo com parâmetros variantes no tempo para representar a não-linearidade do transformador, o que também constitui uma das contribuições deste trabalho. Este algoritmo se baseia em resultados adquiridos por métodos não-convencionais. Os parâmetros do modelo são estimados por Algoritmos Genéticos (AGs). As curvas simuladas serão comparadas às experimentais para validar o modelo obtido.

O AG já foi empregado como método de otimização no projeto de transformadores de potência [13,14]. Também foi aplicado na estimação dos parâmetros do modelo do transformador de três enrolamentos [15] a partir de resultados obtidos com instrumentação convencional. Neste trabalho, o AG é aplicado na estimação de parâmetros do modelo através da minimização da diferença entre as curvas de corrente simuladas e as curvas de corrente experimentais obtidas com instrumentação não-convencional.

## **1.2 Organização da Dissertação**

Para melhor compreensão e leitura, o texto é dividido em sete capítulos, na seguinte ordem:

Primeiro capítulo – Introdução: são apresentados os objetivos deste trabalho;

Segundo capítulo – Teoria Elementar do Transformador: são introduzidos os conceitos fundamentais relativos ao princípio de funcionamento dos transformadores de potência, suas não-idealidades, equacionamento e modelos elétricos equivalentes;

Terceiro capítulo – Normas para Ensaio de Transformadores: são apresentadas as normas técnicas da ABNT relacionadas à especificação, terminologia e métodos de ensaios para determinação de parâmetros e desempenho dos transformadores de potência;

Quarto capítulo – Algoritmos Genéticos: neste capítulo são apresentados diversos métodos de otimização, com destaque especial para os Algoritmos Genéticos. Este método será o empregado na estimação dos parâmetros dos modelos do transformador;

Quinto capítulo – Modelo com Parâmetros Constantes: neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios conforme as normas técnicas. Estes resultados são utilizados na obtenção do modelo com parâmetros constantes no tempo, descrito neste mesmo capítulo;

Sexto capítulo – Modelagem das Não-Linearidades do Transformador e Análise Comparativa entre Resultados dos Ensaio Utilizando Instrumentação Convencional e Não-Convencional: aqui é proposto um procedimento para obtenção de um modelo com parâmetros variantes no tempo. O Algoritmo Genético é utilizado como método de estimação destes parâmetros. É feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios conforme as normas (utilizando instrumentação convencional) e os resultados utilizando uma bancada de ensaios com instrumentação não-convencional;

Sétimo capítulo – Conclusão: são apresentadas as conclusões finais e as propostas para continuidade do trabalho.



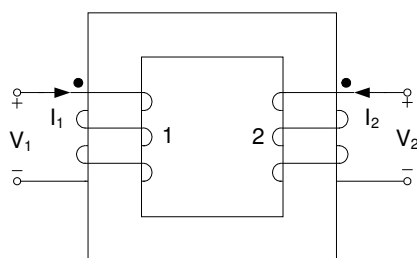
## Capítulo 2

### Teoria Elementar do Transformador

#### 2.1 Introdução

O transformador elétrico se baseia no princípio da força eletromotriz induzida e envolve o intercâmbio de energia entre dois ou mais circuitos elétricos acoplados por um circuito magnético. Neste intercâmbio, a energia elétrica recebida pelo transformador é convertida em energia magnética e, então, novamente convertida em energia elétrica.

Na sua forma mais simples, o transformador consiste de duas bobinas acopladas magneticamente. Sua função é transformar (alterar os níveis de) correntes, tensões ou impedâncias. Para obter seu modelo elétrico, fazem-se necessários uma análise do princípio de funcionamento e um equacionamento conveniente. Isto pode ser feito a partir da configuração mostrada na figura 2.1, que consiste de dois circuitos elétricos acoplados magneticamente.



**Figura 2.1 – Circuitos acoplados magneticamente.**

Os enrolamentos 1 e 2 são formados por  $N_1$  e  $N_2$  espiras, respectivamente, e são enrolados em um núcleo comum feito de material ferromagnético. O princípio fundamental na qual se baseia a teoria elementar do transformador [16] é expresso sob a forma das equações de tensão a seguir:

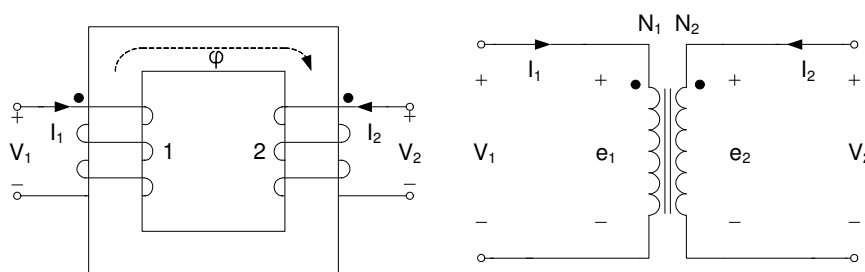
$$V_1 = R_1 I_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (2.1)$$

$$V_2 = R_2 I_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} \quad (2.2)$$

onde  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os enlaces de fluxo resultantes da ação conjunta de  $I_1$  e  $I_2$ ,  $V_1$  e  $V_2$  são as tensões terminais e  $R_1$  e  $R_2$  são resistências ôhmicas. Os índices 1 e 2 se referem aos enrolamentos 1 e 2, respectivamente.

## 2.2 O Modelo Ideal

Na forma mais simples do modelo elétrico equivalente, assume-se que a resistência elétrica dos enrolamentos é nula, as perdas no núcleo são nulas, a permeabilidade magnética do material ferromagnético tende ao infinito e, por fim, o fluxo magnético está inteiramente confinado ao núcleo. A figura 2.2 apresenta um transformador e seu modelo ideal baseado nas simplificações assumidas.



**Figura 2.2 – Transformador e seu modelo ideal.**

De acordo com o modelo ideal, os enlaces de fluxo dos enrolamentos 1 e 2 valem

$$\lambda_1 = N_1 \phi \quad (2.3)$$

$$\lambda_2 = N_2 \phi \quad (2.4)$$

e as equações de tensão 2.1 e 2.2 se tornam

$$V_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

$$V_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.6)$$

onde  $\varphi$  é o fluxo produzido pela ação conjunta das correntes  $I_1$  e  $I_2$ , e  $e_1$  e  $e_2$  são as forças eletromotrizes induzidas por  $\varphi$ . A força magnetomotriz necessária para produzir o fluxo é nula, e assim, a corrente de excitação também o é. Com as polaridades das tensões e sentidos das correntes conforme indicados na figura 2.2, a equação de circulação de campo é

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0 \quad (2.7)$$

Da equação 2.7, a relação entre as correntes  $I_1$  e  $I_2$  é

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{N_2}{N_1} \quad (2.8)$$

Das equações 2.5 e 2.6, a relação entre as tensões terminais  $V_1$  e  $V_2$  é

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.9)$$

Uma impedância vista pelo enrolamento 2 pode ser expressa por

$$Z_2 = \frac{V_2}{-I_2} \quad (2.10)$$

Porém, a impedância vista por uma fonte de energia conectada ao enrolamento 1 pode ser expressa por

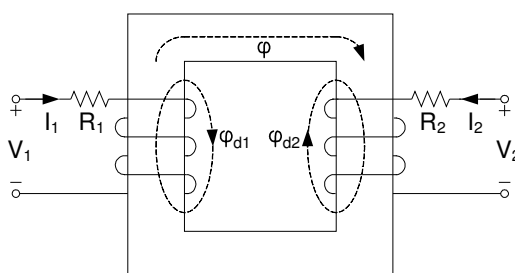
$$Z_2' = \frac{V_1}{I_1} = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right) V_2}{-\left(\frac{N_2}{N_1}\right) I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_2}{-I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \quad (2.11)$$

Dessa forma, a impedância vista pela fonte é igual à impedância da carga multiplicada pela relação de espiras ao quadrado. As equações 2.8, 2.9 e 2.11 juntamente com o circuito elétrico da figura 2.2 constituem o modelo ideal do transformador. Este modelo simples exprime a principal característica do transformador, que é transformar tensões, correntes e impedâncias.

Por outro lado, para representar as não idealidades do transformador, um modelo mais elaborado deve ser proposto. A seguir, será descrita a forma mais correta de representar matematicamente todos os fenômenos físicos associados ao transformador operando em regime permanente.

### 2.3 O Modelo Real do Transformador

Parte da energia entregue a um transformador é devolvida ao sistema a ele conectado, e outra parte é convertida em outras formas de energia. Define-se eficiência como a relação entre a energia entregue pelo transformador em um intervalo de tempo e a energia recebida por ele neste mesmo intervalo. As perdas de energia inerentes a este processo são características dos materiais empregados na construção do transformador e na própria forma de como ele é montado. O modelo real do transformador é aquele que leva em conta todos (ou quase todos) os fenômenos físicos associados a este equipamento. A análise a seguir será feita com base nos dois circuitos elétricos acoplados magneticamente mostrados na figura 2.3.



**Figura 2.3 – Circuitos acoplados para análise não-ideal.**

Os enrolamentos 1 e 2 possuem  $N_1$  e  $N_2$  espiras, respectivamente. A maneira como as espiras estão dispostas nos enrolamentos tem influência na distribuição dos campos. Se num primeiro momento for considerado que todas as espiras dos dois enrolamentos são compactadas em duas únicas espiras, pode-se afirmar que o fluxo total produzido por cada

enrolamento enlaça todas suas respectivas espiras. Ainda mais, haveria uma distinção clara entre o fluxo produzido por um enrolamento que enlaça todas as espiras do outro enrolamento e o fluxo que não o faz. Num transformador real, porém, as espiras estão dispostas de maneira que se deva levar em conta a distribuição do campo magnético na região ocupada pelo enrolamento. Neste caso, nem todo o fluxo enlaça todas as espiras que o produzem, nem enlaçam todas as espiras do outro enrolamento. Por este motivo, é conveniente introduzir o conceito de fluxos equivalentes [16].

Definindo  $\lambda_{11}$  como o enlace de fluxo do enrolamento 1 produzido pela corrente  $I_1$  percorrendo  $N_1$ , o fluxo equivalente  $\varphi_{11}$  considerado como enlaçando todas as  $N_1$  espiras é definido como

$$\varphi_{11} \equiv \frac{\lambda_{11}}{N_1}, \quad (2.12)$$

para corrente nula no enrolamento 2. Esse fluxo pode ser decomposto em duas componentes. Uma componente de magnetização, definida como o fluxo que enlaça todas as  $N_2$  espiras do enrolamento 2, e uma componente de dispersão. Definindo  $\lambda_{21}$  como o enlace de fluxo do enrolamento 2 produzido pela corrente  $I_1$  circulando no enrolamento 1, o fluxo de magnetização equivalente  $\varphi_{21}$  considerado como enlaçando todas as  $N_2$  espiras é definido como

$$\varphi_{21} \equiv \frac{\lambda_{21}}{N_2} \quad (2.13)$$

Outra componente do fluxo  $\varphi_{11}$  não enlaça as espiras do enrolamento 2 e é definida como fluxo de dispersão  $\varphi_{d1}$ , ou seja,

$$\varphi_{d1} \equiv \varphi_{11} - \varphi_{21} \quad (2.14)$$

Similarmente, pode-se definir  $\lambda_{22}$  como o enlace de fluxo do enrolamento 2 produzido pela corrente  $I_2$  circulando no enrolamento 2. O fluxo equivalente  $\varphi_{22}$  considerado como enlaçando todas as  $N_2$  espiras é definido como

$$\varphi_{22} \equiv \frac{\lambda_{22}}{N_2}, \quad (2.15)$$

para corrente nula no enrolamento 1. Esse fluxo pode ser decomposto em duas componentes. Uma componente de magnetização, definida como o fluxo que enlaça todas  $N_1$  espiras do enrolamento 1, e uma componente de dispersão. Definindo  $\lambda_{12}$  como o enlace de fluxo do enrolamento 1 produzido pela corrente  $I_2$  circulando no enrolamento 2, o fluxo de magnetização equivalente  $\varphi_{12}$  considerado como enlaçando todas as  $N_1$  espiras é definido como

$$\varphi_{12} \equiv \frac{\lambda_{12}}{N_1} \quad (2.16)$$

Outra componente do fluxo  $\varphi_{22}$  não enlaça as espiras do enrolamento 1 e é definida como fluxo de dispersão  $\varphi_{d2}$ , ou seja,

$$\varphi_{d2} \equiv \varphi_{22} - \varphi_{12} \quad (2.17)$$

Com corrente circulando em ambos os enrolamentos, os fluxos resultantes  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ , considerados como enlaçando todas as espiras com as quais estão associados, e produzindo enlaces de fluxo  $N_1\varphi_1$  e  $N_2\varphi_2$  iguais aos enlaces de fluxo  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  resultantes da ação conjunta de  $I_1$  e  $I_2$ , são compostos de uma parcela de dispersão, uma parcela devido à corrente no respectivo enrolamento e uma parcela devido à corrente no outro enrolamento, ou seja,

$$\varphi_1 = \varphi_{d1} + \varphi_{21} + \varphi_{12} \quad (2.18)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{d2} + \varphi_{12} + \varphi_{21} \quad (2.19)$$

O fluxo mútuo resultante da ação conjunta das correntes nos dois enrolamentos é a soma dos fluxos devido a cada corrente agindo separadamente, ou seja,

$$\varphi = \varphi_{21} + \varphi_{12} \quad (2.20)$$

Portanto, as equações 2.18 e 2.19 podem ser reescritas como

$$\varphi_1 = \varphi_{d1} + \varphi \quad (2.21)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{d2} + \varphi \quad (2.22)$$

Dessa forma, a distribuição real dos campos num transformador é equivalente àquela ilustrada na figura 2.3, em que as forças magnetomotrizes produzidas pelas correntes  $I_1$  e  $I_2$  formam, em conjunto, o fluxo magnetizante  $\varphi$  (que enlaça todas as  $N_1$  e  $N_2$  espiras), e os fluxos de dispersão  $\varphi_{d1}$  e  $\varphi_{d2}$  (que enlaçam somente as espiras de seus respectivos enrolamentos). As equações 2.1 e 2.2 podem, então, ser reescritas como

$$V_1 = R_1 I_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} \quad (2.23)$$

$$V_2 = R_2 I_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} = R_2 I_2 + N_2 \frac{d\varphi_2}{dt} \quad (2.24)$$

Apesar da não-linearidade do núcleo magnético, os fluxos de dispersão são aproximadamente proporcionais às correntes que os produzem, já que a maior parte de seus caminhos consiste em ar e no cobre dos enrolamentos. Portanto, parâmetros relacionados a estas grandezas podem ser considerados como lineares. Desse modo, é conveniente introduzir o conceito de indutâncias de dispersão.

A indutância do enrolamento 1 devido ao fluxo de dispersão  $\varphi_{d1}$  é definida como a indutância de dispersão  $L_{d1}$  do enrolamento 1. Da mesma forma, a indutância do enrolamento 2 devido ao fluxo de dispersão  $\varphi_{d2}$  é definida como a indutância de dispersão  $L_{d2}$  do enrolamento 2, ou seja,

$$L_{d1} \equiv \frac{N_1 \varphi_{d1}}{I_1} \quad (2.25)$$

$$L_{d2} \equiv \frac{N_2 \varphi_{d2}}{I_2} \quad (2.26)$$

As equações 2.23 e 2.24 podem agora ser reescritas em termos das indutâncias de dispersão,

$$V_1 = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\varphi_{d1}}{dt} + \frac{N_1 d\varphi}{dt} = R_1 I_1 + L_{d1} \frac{dI_1}{dt} + e_1 \quad (2.27)$$

$$V_2 = R_2 I_2 + N_2 \frac{d\varphi_{d2}}{dt} + \frac{N_2 d\varphi}{dt} = R_2 I_2 + L_{d2} \frac{dI_2}{dt} + e_2 \quad (2.28)$$

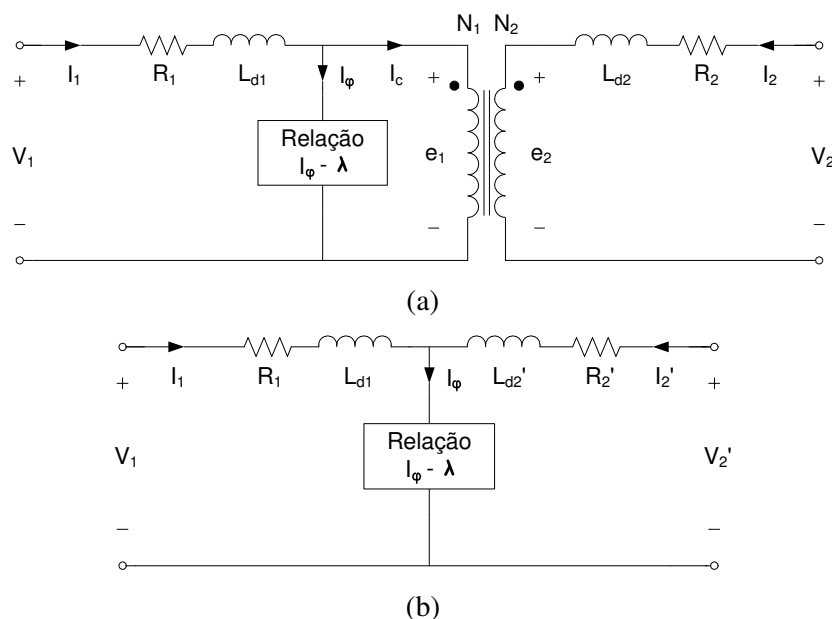
onde  $e_1$  e  $e_2$  são as forças eletromotrizes induzidas pelo fluxo mútuo  $\varphi$ . Dessa forma, as tensões terminais  $V_1$  e  $V_2$  podem ser expressas como a soma de uma tensão devida à resistência elétrica do enrolamento, uma tensão induzida pelo fluxo de dispersão e uma tensão induzida pelo fluxo mútuo resultante  $\varphi$ . As resistências e indutâncias de dispersão nas equações 2.27 e 2.28 são parâmetros essencialmente constantes.

A corrente  $I_1$  geralmente é decomposta em duas componentes: uma componente de excitação  $I_\varphi$  e uma componente de carga  $I_c$ . A corrente  $I_\varphi$  é a corrente necessária para produzir o fluxo no núcleo magnético e é equivalente à corrente em aberto do transformador quando o fluxo magnético é o mesmo que sob carga. A corrente  $I_c$  é a corrente que produz uma força magnetomotriz que contrabalança exatamente a força magnetomotriz da corrente  $I_2$ , ou seja,

$$N_1 I_c + N_2 I_2 = 0 \quad (2.29)$$

As equações 2.27, 2.28 e 2.29 permitem obter o modelo elétrico equivalente do transformador. Neste modelo, mostrado na figura 2.4a, as tensões primária  $V_1$  e secundária  $V_2$  são representadas pelas tensões nas resistências ôhmicas  $R_1$  e  $R_2$  dos enrolamentos em série com as indutâncias de dispersão  $L_{d1}$  e  $L_{d2}$  e com as forças eletromotrizes induzidas  $e_1$  e  $e_2$ . Este modelo é semelhante ao modelo do transformador ideal, ilustrado na figura 2.2, mas inclui parâmetros que representam as imperfeições do transformador real. O transformador ideal na figura 2.4a possui  $N_1$  e  $N_2$  espiras e tensões terminais  $e_1$  e  $e_2$  induzidas pelo fluxo mútuo  $\varphi$ . A corrente primária  $I_1$  e suas componentes de excitação  $I_\varphi$  e de carga  $I_c$  têm seus sentidos indicados no modelo. O ramo percorrido pela corrente  $I_\varphi$  é chamado ramo de excitação e representa a relação entre  $I_\varphi$  e o enlace de fluxo  $\lambda$ , o qual é igual a  $N_1 \varphi$ . Algumas maneiras de modelar tal ramo são descritas na próxima seção.





**Figura 2.4 – Modelo real do transformador.**

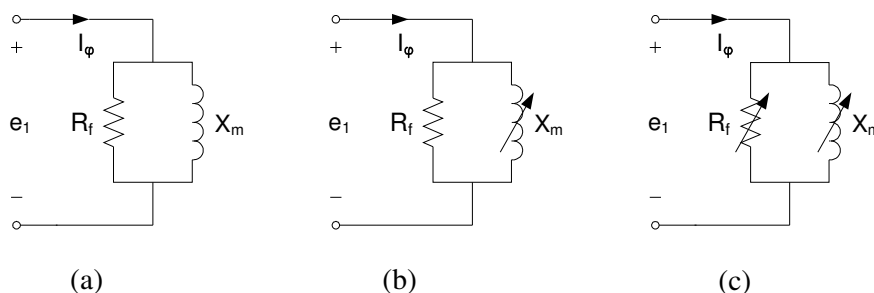
A figura 2.4b ilustra o chamado modelo “T” do transformador. É semelhante ao modelo da figura 2.4a, porém, os parâmetros do enrolamento 2 e as grandezas tensão e corrente estão referidas ao enrolamento 1. As equações 2.27 e 2.28 juntamente com o modelo elétrico equivalente da figura 2.4 constituem o modelo do transformador operando em regime permanente.

### 2.3.1 Modelagem da Não-Linearidade do Núcleo

O material que compõe o núcleo magnético dos transformadores de potência apresenta uma relação não-linear entre a indução e o campo magnético na região de saturação do material. Isto, aliado às perdas magnéticas em regime alternado de indução, implica numa corrente de excitação com forma de onda peculiar. Por esta razão, o modelo do núcleo deve levar em conta esses efeitos. Porém, na maioria das vezes, a corrente de excitação é de magnitude desprezível se comparada à magnitude da corrente nominal dos enrolamentos. Com isso, a corrente de excitação pode ser modelada com certa precisão usando um núcleo representado por parâmetros constantes no tempo.

Numa abordagem linear, o comportamento do núcleo é modelado por uma resistência  $R_f$  em paralelo com uma reatância  $X_m$ , ambas constantes no tempo. A combinação destes dois elementos irá dissipar a mesma potência ativa e drenar a mesma corrente de excitação que o núcleo real. No ramo  $R_f$  circula uma componente da corrente

de excitação, denominada componente de perdas no núcleo  $I_{Rf}$ , que está em fase com a força eletromotriz induzida  $e_1$ . Em  $X_m$  circula outra componente da corrente de excitação, denominada corrente de magnetização  $I_{Xm}$ , que está em quadratura com  $e_1$ , ou em fase com o fluxo. A figura 2.5a apresenta o modelo equivalente do núcleo do transformador para um ponto de operação em tensão e frequência constantes, no qual seus parâmetros são constantes.



**Figura 2.5 – Modelos do núcleo; (a) modelo com parâmetros constantes; (b) e (c) modelos com parâmetros variáveis no tempo.**

Quando a saturação magnética é considerada, a relação não-linear entre a corrente de magnetização  $I_{Xm}$  e o enlace de fluxo  $\lambda_1$  pode ser modelada por uma função dependente do tempo. Assim, este comportamento do material magnético é modelado por uma reatância variável no tempo, como apresentada nos modelos das figuras 2.5b e 2.5c.

A resistência  $R_f$  modela as perdas magnéticas e seu valor é tal que sua energia dissipada em um período se iguala à energia dissipada no núcleo neste mesmo intervalo. Dessa forma, as resistências apresentadas nos modelos das figuras 2.5b e 2.5c devem ter valores que satisfaçam a esta condição. Para modelar com precisão a corrente de excitação, tanto  $X_m$  quanto  $R_f$  são variantes no tempo e, portanto, o modelo usado deve ser o apresentado na figura 2.5c. Tal precisão nem sempre é requerida, já que, como mencionado anteriormente, a corrente de excitação representa uma pequena parcela da corrente drenada pelo transformador em plena carga, e o modelo empregado pode ser aquele apresentado na figura 2.5a.

O interesse na obtenção de um modelo com parâmetros variantes no tempo, como o apresentado na figura 2.5c, é que ele permite analisar as perdas magnéticas e o efeito da saturação em cada instante de tempo, bem como modelar a corrente de excitação de forma precisa para análise comparativa com resultados obtidos em ensaio conforme as normas técnicas. Neste trabalho, serão considerados todos os modelos apresentados na figura 2.5.

## 2.4 Conclusão

Este capítulo apresentou uma análise qualitativa dos fenômenos envolvidos na operação de um transformador. A partir desta análise, obtem-se seu modelo elétrico equivalente através de um equacionamento conveniente.

No modelo ideal, assume-se que as perdas no núcleo e nos enrolamentos são desprezíveis, que não há dispersão magnética e que a corrente de excitação é nula. Este modelo simples descreve a principal característica do transformador, que é transformar tensões, correntes e impedâncias. Por outro lado, para representar os fenômenos físicos associados ao transformador operando em regime permanente, o modelo real deve considerar as não-idealidades dos materiais empregados em sua construção bem como a distribuição real dos campos.

Os fluxos de dispersão são aproximadamente proporcionais às correntes que os produzem, já que a maior parte de seus caminhos consiste em ar e cobre dos enrolamentos. Portanto, as indutâncias de dispersão associadas a estes fluxos podem ser consideradas constantes no tempo e, com isso, a não-linearidade fica confinada ao modelo do núcleo do transformador.

No capítulo seguinte, serão apresentados os procedimentos para ensaios de transformadores de potência conforme as normas técnicas. Os resultados destes ensaios permitem obter os valores dos parâmetros do modelo com parâmetros constantes.

## Capítulo 3

### Normas para Ensaio de Transformadores

#### 3.1 Introdução

Os ensaios para determinação de parâmetros e desempenho de transformadores são definidos por normas técnicas, as quais descrevem o procedimento para estes ensaios. Este capítulo tem o objetivo de apresentar resumidamente as normas relacionadas aos métodos de ensaios de transformadores de potência, com enfoque nos ensaios para determinação dos parâmetros do modelo do transformador, da regulação e do rendimento.

Os ensaios descritos pelas normas abrangem transformadores monofásicos e polifásicos, com dois ou mais enrolamentos bem como autotransformadores. Neste trabalho será dado enfoque na descrição e execução de ensaios em transformadores monofásicos de dois enrolamentos isolados a seco. Porém, os mesmos ensaios se aplicam também a transformadores trifásicos isolados a óleo, com poucas mudanças no procedimento e nos esquemas de ligações.

#### 3.2 Transformadores de Potência: Métodos de Ensaio

As especificações, a terminologia e os procedimentos para ensaio de transformadores de potência estão estabelecidos pelas normas técnicas NBR 5356 [17], NBR 5458 [1] e NBR 5380 [6], respectivamente. Estas normas abrangem transformadores de potência monofásicos com potência nominal superior a 1 kVA bem como transformadores polifásicos com potência superior a 5 kVA.

A NBR 5380 abrange uma série de ensaios para determinação de parâmetros e características dos transformadores, como ensaios para determinação da resistência elétrica dos enrolamentos, relação de tensões, resistência de isolamento, polaridade, perdas em vazio e corrente de excitação, perdas em carga e impedância de curto-circuito,

deslocamento angular, elevação de temperatura, entre outros. Para a obtenção do modelo do transformador, alguns ensaios são essenciais: ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos, perdas em vazio, corrente de excitação, perdas em carga e impedância de curto-circuito. O rendimento e a regulação são obtidos de forma analítica, a partir dos dados adquiridos nos ensaios de perdas em vazio, perdas em carga e impedância de curto-circuito. Estes ensaios são descritos a seguir.

### 3.2.1 Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos

Neste ensaio é registrada a resistência elétrica de cada enrolamento, os terminais entre os quais é medida a resistência elétrica bem como a temperatura dos enrolamentos. A medição é efetuada com corrente contínua por um método de ponte ou pelo método da queda de tensão. Este último consiste em conectar uma fonte de tensão contínua nos terminais do enrolamento e determinar sua resistência a partir do valor de corrente medida.

A resistência elétrica do enrolamento varia em função da temperatura. Por essa razão, deve ser aplicada uma correção apropriada. Os valores de resistência, medidos na temperatura do meio circundante, são convertidos para um valor de resistência numa temperatura de referência através da equação 3.1,

$$R'_t = R_t \frac{t_2 + k_t}{t_1 + k_t} \quad (3.1)$$

onde  $R_t$  ( $\Omega$ ) é a resistência medida na temperatura do meio circundante  $t_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R'_t$  ( $\Omega$ ) é a resistência calculada na temperatura de referência  $t_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $k_t$  vale 234,5 para enrolamentos de cobre e 225,0 para enrolamentos de alumínio.

#### 3.2.1.1 Considerações sobre o Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos

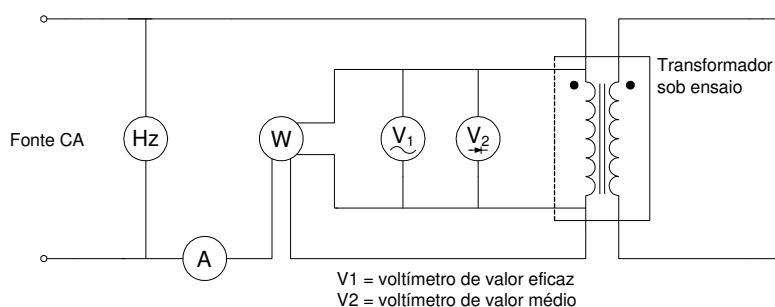
1. A corrente utilizada no ensaio não deve ser superior a 15% da corrente nominal do enrolamento considerado;
2. A temperatura registrada é obtida pela média aritmética de pelo menos três termômetros ou pares termoelétricos colocados na superfície do enrolamento e deve ser igual à temperatura do meio circundante.

## 3.2.2 Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação

### 3.2.2.1 Perdas em Vazio

A NBR 5356 define perdas em vazio como a potência ativa absorvida pelo transformador quando alimentado por um de seus enrolamentos, com os terminais dos demais enrolamentos em circuito aberto. Segundo a norma NBR 5380, as perdas em vazio consistem, principalmente, nas perdas por histerese e por correntes de Foucault, e são função do valor eficaz, da frequência e da forma de onda da tensão de alimentação.

Nesse ensaio, um dos enrolamentos do transformador é conectado à fonte CA conforme a figura 3.1. A corrente no enrolamento secundário, neste caso, é nula, porém flui uma corrente de pequena intensidade no enrolamento primário, chamada corrente de excitação, necessária à manutenção do fluxo magnético no núcleo.



**Figura 3.1 – Diagrama de ligações para ensaio de perdas em vazio.**

De acordo com a NBR 5380, a tensão de alimentação deve ser ajustada para o valor nominal do enrolamento pelo voltímetro de valor médio. Após a leitura dos aparelhos de medição, a norma propõe uma correção para a potência devido à carga destes instrumentos de leitura, fazendo nova leitura do wattímetro após desconectar o transformador sob ensaio e mantendo-se a mesma tensão de alimentação. A potência realmente absorvida pelo transformador ( $W_E$ ) é igual à diferença entre a potência aparente absorvida ( $W_I$ ) e a potência devido à carga dos instrumentos ( $W_0$ ), isto é:

$$W_E = W_I - W_0 \quad (3.2)$$

As perdas em vazio devem ser medidas com tensão nominal e referidas à tensão senoidal pura (sem distorção). Ocorre que a tensão de alimentação, que deveria ser senoidal, é distorcida pelo conteúdo harmônico da corrente de excitação. Para a medição das perdas em vazio com uma tensão com forma de onda distorcida, a norma propõe uma correção no valor medido das perdas, para referi-las à tensão senoidal pura. A correção a ser feita nas perdas em vazio medidas é dada pela equação 3.3,

$$W_S = W_E \frac{100}{W_h \% + k_f W_f \%} \quad (3.3)$$

$$k_f = \left( \frac{V_{ef}}{1,1 V_{med}} \right)^2 \quad (3.4)$$

onde  $W_S$  (W) representa as perdas em vazio para tensão senoidal pura,  $W_h$  representa as perdas por histerese (em porcentagem relativa a  $W_E$ ),  $W_f$  representa as perdas por correntes de Foucault (em porcentagem relativa a  $W_E$ ), e  $V_{ef}$  e  $V_{med}$  são o valor eficaz e o valor médio retificado da tensão de alimentação, respectivamente. Para a equação 3.3, a norma propõe que os valores de  $W_h$  e  $W_f$  devem ser medidos. Contudo, na falta destes, propõe atribuir valores típicos de 50% para  $W_h$  e  $W_f$ .

A norma NBR 5456 define fator de forma  $F_c$  como a relação entre o valor eficaz e o valor retificado de uma grandeza periódica. O valor retificado é definido, conforme esta mesma norma, como a média aritmética dos valores absolutos de uma grandeza periódica, durante um período. Como exemplo, uma tensão  $V(t)$  periódica dada pela equação 3.5 tem um fator de forma dado pela equação 3.6.

$$V(t) = V_m \text{sen}(wt) \quad (3.5)$$

$$F_c = \frac{V_{ef}}{V_{med}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T |V(t)| dt} = \frac{V_m / \sqrt{2}}{2V_m / \pi} = 1,11 \quad (3.6)$$

Portanto para as equações 3.3 e 3.4 com alimentação puramente senoidal,  $W_S = W_E$ . Com alimentação distorcida, as equações indicam que, para alimentação com fator de forma menor que 1,11, as perdas diminuem. Já para fator de forma maior que 1,11, as

perdas aumentam em relação às perdas com tensão senoidal pura. De fato, uma tensão tendo um fator de forma inferior àquele de uma senóide induzirá perdas no núcleo inferiores àquelas que induziria sob uma tensão senoidal pura, para a mesma frequência e para a mesma indução máxima [7].

Por outro lado, a equação 3.3 deixa dúvidas quanto à separação das perdas em vazio medidas  $W_E$  nas componentes  $W_h$  e  $W_f$ . A tendência atual de modelagem das perdas está na sua separação em três componentes: perdas por histerese (perdas estáticas), perdas por corrente de Foucault e perdas por excesso. Estas duas últimas são denominadas perdas dinâmicas e variam com a frequência. Na norma não existe qualquer menção às perdas por excesso. A referência [7] aponta que se podem associar as perdas dinâmicas ao fator de forma da tensão. Contudo, a norma propõe atribuir valor típico de 50% para  $W_h$  e para  $W_f$ , o que é uma simplificação, já que a contribuição de cada parcela para a perda total varia em função da frequência bem como do valor máximo e da forma de onda da densidade de fluxo [7]. Também varia para diferentes materiais.

### 3.2.2.2 Corrente de Excitação

No ensaio para medição da corrente de excitação, o esquema de ligações é o mesmo da figura 3.1, podendo-se retirar o wattímetro do circuito. A norma NBR 5380 estabelece os seguintes passos para esse ensaio:

1. Ajustar a tensão em seu valor nominal pelo voltímetro de valor eficaz  $V_1$ , e fazer a leitura do amperímetro;
2. Ajustar novamente a tensão nominal pelo voltímetro de valor médio  $V_2$  e fazer a leitura do voltímetro de valor eficaz  $V_1$  e do amperímetro;
3. Se a leitura de  $V_1$  e  $V_2$  no passo anterior não diferirem em mais de 10%, o valor da corrente de excitação será a média das leituras dos amperímetros nos passos 1 e 2. Caso contrário, o método de medição deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.

O objetivo do procedimento descrito acima é obter, de forma aproximada, a corrente de excitação levando em conta a distorção da forma de onda da tensão de alimentação.



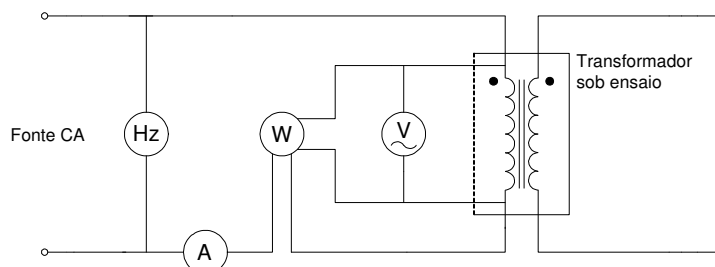
### 3.2.2.3 Considerações sobre os Ensaios de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação

1. As ligações podem ser feitas tanto no enrolamento de alta-tensão como no de baixa-tensão, sendo mais conveniente neste último, para maior facilidade na medição da tensão.

### 3.2.3 Ensaios de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito

#### 3.2.3.1 Perdas em Carga

A NBR 5356 define perdas em carga como a potência ativa absorvida pelo transformador quando alimentado por um de seus enrolamentos com os terminais de um outro enrolamento em curto-circuito. Neste ensaio, um dos enrolamentos do transformador é conectado à fonte CA conforme a figura 3.2. Deve-se aplicar uma tensão reduzida nesse enrolamento para nele circular corrente nominal. Essa tensão é denominada tensão de curto-circuito  $E_z$ . Os terminais do outro enrolamento estão em curto-circuito.



**Figura 3.2 – Diagrama de ligações para ensaio de perdas em carga.**

Após a leitura dos aparelhos de medição, a norma propõe uma correção para a potência devido à carga destes instrumentos de leitura, fazendo nova leitura do wattímetro após desconectar o transformador sob ensaio e mantendo-se a mesma tensão de alimentação. Esta correção é semelhante à feita no ensaio de perdas em vazio. Neste caso, a potência realmente absorvida pelo transformador ( $W_E$ ) é dada pela equação 3.2.

A temperatura dos enrolamentos deve ser determinada antes e após o ensaio. A média aritmética das duas leituras deve ser tomada como a temperatura do ensaio  $t_1$ . Para se obter as perdas em carga numa temperatura de referência  $t_2$  a partir das perdas em carga na temperatura de ensaio  $t_1$ , deve-se observar que as perdas em carga  $W_E$  compõem-se,

segundo a norma, das perdas ôhmicas  $W_R$  e das perdas adicionais  $W_A$ . As perdas ôhmicas aumentam com a elevação da temperatura, e são determinadas pela soma das perdas  $IR^2$  dos dois enrolamentos, onde  $I$  representa as correntes eficazes com as quais foi feito o ensaio de perdas em carga, e  $R$  representa as resistências medidas dos respectivos enrolamentos no ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos, corrigidas para a temperatura  $t_l$ , conforme a equação 3.7.

$$W_R = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (3.7)$$

As perdas adicionais têm origem no fluxo disperso que provoca correntes induzidas em partes estruturais dos transformadores [16]. As correntes induzidas no interior dos condutores devidas à não-uniformidade da densidade de corrente também geram perdas adicionais. Esta não-uniformidade, causada pelo campo magnético alternante, quando provocada pela corrente do próprio condutor, é chamada de efeito pelicular. Quando provocada pelas correntes dos condutores adjacentes, é chamada de efeito de proximidade [18]. Contudo, para frequências nominais de transformadores de potência, estes efeitos são desprezíveis [18].

As perdas adicionais são representadas no modelo considerando o fato que as resistências efetivas dos enrolamentos são superiores às resistências obtidas no ensaio em corrente contínua [16]. Estas perdas diminuem com a elevação da temperatura, e são determinadas pela diferença entre as perdas em carga medidas e as perdas ôhmicas calculadas.

$$W_A = W_E - W_R \quad (3.8)$$

Assim, quando é necessário converter as perdas em carga de uma temperatura  $t_l$  para outra temperatura de referência  $t_2$ , segundo a norma, as duas componentes se convertem separadamente, conforme as equações abaixo:

$$W_R' = W_R \frac{t_2 + k_t}{t_1 + k_t} \quad (3.9)$$

$$W_A' = W_A \frac{t_1 + k_t}{t_2 + k_t} \quad (3.10)$$

onde  $W'_R$  e  $W'_A$  (W) são, respectivamente, as perdas ôhmicas e as perdas adicionais à temperatura de referência  $t_2$  (°C),  $t_1$  (°C) é a temperatura de ensaio, e  $k_t$  vale 234,5 para enrolamentos de cobre e 225,0 para enrolamentos de alumínio. As perdas em carga para uma temperatura  $t_2$  são então dadas por

$$W'_E = W'_A + W'_R \quad (3.11)$$

A temperatura tem uma influência importante no valor das resistências elétricas dos enrolamentos. Dessa forma, quando o ensaio de perdas em carga é realizado a uma temperatura diferente da temperatura normal de operação do transformador em plena carga, as perdas nos enrolamentos devem ser referenciadas a esta temperatura. As perdas adicionais, ao contrário, são pequenas se comparadas às perdas nos enrolamentos, e por este motivo, têm pouca influência nas perdas em carga. Seu valor diminui com o aumento da temperatura, já que este aumento provoca uma elevação nas resistências elétricas das partes estruturais do transformador, provocando também uma redução na intensidade das correntes induzidas nestas partes, e conseqüente redução nas perdas adicionais.

### 3.2.3.2 Impedância de Curto-Circuito

A impedância de curto-circuito  $Z$ , referida ao enrolamento sob tensão, é constituída de uma componente resistiva  $R$  e uma componente reativa  $X$ . Estas componentes são obtidas usando as equações abaixo:

$$Z = \frac{E_z}{I_n} \quad (3.12)$$

$$R = \frac{W_E}{I_n^2} \quad (3.13)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (3.14)$$

onde  $E_z$  (V) é a tensão de curto-circuito e  $I_n$  (A) é a corrente nominal do enrolamento sob tensão.

A impedância de curto-circuito é geralmente expressa em porcentagem. Neste caso, seu valor é igual ao da tensão de curto-circuito quando expressa como porcentagem

relativa à tensão nominal do enrolamento. É dada pela equação 3.15, e suas componentes resistiva e reativa, pelas equações 3.14 e 3.15, respectivamente,

$$Z_{\%} = \frac{E_z}{V_n} \cdot 100\% \quad (3.15)$$

$$R_{\%} = \frac{W_E}{S_n} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

$$X_{\%} = \sqrt{Z_{\%}^2 - R_{\%}^2} \quad (3.17)$$

onde  $V_n$  (V) é a tensão nominal do enrolamento e  $S_n$  (VA) é a potência aparente nominal do enrolamento.

As componentes resistivas  $R$  e  $R_{\%}$  variam com a temperatura, enquanto que as componentes reativas  $X$  e  $X_{\%}$  não variam. Assim, quando se deseja converter a impedância de curto-circuito de uma temperatura  $t_1$  para uma temperatura de referência  $t_2$ , os novos valores das componentes resistivas são calculados pelas equações 3.18 e 3.19,

$$R' = \frac{W'_E}{I_n^2} \quad (3.18)$$

$$R'_{\%} = \frac{W'_E}{S_n} 100\% \quad (3.19)$$

e as impedâncias de curto-circuito para a temperatura de referência  $t_2$  são calculadas pelas equações 3.20 e 3.21.

$$Z' = \sqrt{R'^2 + X^2} \quad (3.20)$$

$$Z'_{\%} = \sqrt{R'_{\%}^2 + X_{\%}^2} \quad (3.21)$$

### 3.2.3.3 Considerações sobre os Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito

1. A impedância de curto-circuito e suas componentes resistiva e reativa são referidas ao enrolamento sob tensão;
2. De preferência, e por maior facilidade, devem-se conectar em curto-circuito os terminais do enrolamento de baixa tensão;
3. O condutor utilizado para curto-circuitar o transformador deve ter seção igual ou superior à do seu terminal de conexão, e deve ser tão curto quanto possível;
4. As medições devem ser executadas rapidamente para que a elevação de temperatura não cause erros significantes.

### 3.2.4 Regulação

A norma NBR 5458 define regulação de um transformador de dois enrolamentos como a diferença aritmética entre a tensão em vazio de um enrolamento e a tensão em carga (especificada) nos terminais do mesmo enrolamento, com tensão nominal aplicada ao outro enrolamento. A NBR 5380 propõe uma equação para calcular, de forma aproximada, a regulação de um transformador monofásico de dois enrolamentos, com base nos resultados do ensaio de perdas em carga. As regulações para cargas indutiva e capacitiva são dadas pelas equações 3.22 e 3.23, respectivamente,

$$Reg = \sqrt{(r + fp)^2 + (x + fr)^2} - 1 \quad (3.22)$$

$$Reg = \sqrt{(r + fp)^2 + (x - fr)^2} - 1 \quad (3.23)$$

onde  $fp$  é o fator de potência da carga,  $fr = \sqrt{1 - fp^2}$ ,  $r = R\% / 100\%$  e  $x = X\% / 100\%$ .

### 3.2.5 Rendimento

A norma NBR 5458 define rendimento de um transformador como a relação entre a potência ativa fornecida e a potência ativa recebida pelo transformador. O rendimento é calculado conforme abaixo,

$$N = 1 - \frac{W}{P + W} \quad (3.24)$$

onde  $W$  representa as perdas totais determinadas pela soma das perdas em vazio e das perdas em carga, à temperatura considerada, e  $P$  é a potência fornecida pelo transformador. A norma NBR 5380 estabelece que o rendimento deve ser determinado em condições nominais de operação e com fator de potência unitário no enrolamento secundário.

### 3.3. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos de ensaios definidos por normas técnicas para a determinação dos parâmetros do modelo de um transformador de potência. Para isso, alguns ensaios são essenciais: ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos, ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação, e ensaio de perdas em carga e impedância de curto-circuito. Os ensaios de perdas em vazio e perdas em carga são semelhantes aos ensaios clássicos de circuito aberto e curto-circuito descritos na literatura, exceto pela inclusão de correção para as perdas em função da temperatura e em função da distorção da forma de onda da tensão de alimentação. Os ensaios descritos são ditos convencionais por utilizar instrumentação convencional (voltímetro, amperímetro e wattímetro) para a leitura das grandezas elétricas.

O ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos é realizado em corrente contínua. Dessa forma, não há fluxo alternado e a tensão aplicada nos terminais do enrolamento é igual à tensão sobre sua resistência elétrica. Com o conhecimento preciso destas resistências é possível calcular as perdas associadas aos enrolamentos e referi-las a uma temperatura diferente da qual foi realizado o ensaio (por exemplo, a temperatura normal de operação do transformador em plena carga).

O ensaio de perdas em vazio é realizado em tensão e frequência nominais. Dessa forma, as perdas no núcleo são próximas às nominais. A norma propõe a utilização de um voltímetro de valor eficaz e um voltímetro de valor médio para medição e análise da tensão de alimentação durante o ensaio. A leitura simultânea destes dois instrumentos indicará se há e qual a intensidade da distorção da forma de onda da tensão em relação à forma de onda senoidal. As perdas em vazio devem ser referidas à tensão senoidal. Uma forma de onda de tensão de alimentação distorcida é resultado de uma indução magnética no núcleo

também distorcida. Isso gera perdas em vazio diferentes, se comparadas às perdas em regime senoidal. A norma sugere que as perdas por histerese e por correntes de Foucault devem ser medidas quando a forma de onda da tensão é distorcida, contudo não descreve um procedimento para separação das perdas. A norma nada menciona sobre a variação das perdas em vazio em função da temperatura.

O ensaio para determinação da corrente de excitação também leva em conta a distorção da forma de onda da tensão de alimentação. Por outro lado, devido à não-linearidade do material magnético que compõe o núcleo, a corrente de excitação é distorcida mesmo com uma tensão de alimentação puramente senoidal.

As perdas em carga são formadas principalmente pelas perdas ôhmicas nos enrolamentos. O ensaio é realizado em corrente nominal. Dessa forma, as perdas nos enrolamentos são próximas às nominais. As perdas adicionais são obtidas pela diferença entre as perdas em carga e as perdas ôhmicas devido à resistência elétrica dos enrolamentos. O rendimento e a regulação são calculados a partir das perdas obtidas nos ensaios em vazio e em carga e, por este motivo, também são dependentes da temperatura.

Este capítulo teve o objetivo de apresentar as normas relacionadas aos métodos de ensaios de transformadores de potência, com enfoque nos ensaios para determinação dos parâmetros do modelo do transformador. Os procedimentos descritos neste capítulo serão empregados nos ensaios realizados neste trabalho.

No capítulo seguinte é apresentado o Algoritmo Genético, que será empregado na estimação de parâmetros do modelo do transformador utilizando dados de ensaios obtidos com instrumentação convencional e não-convencional. Já no capítulo 5 são apresentados os procedimentos adotados bem como os resultados obtidos nos ensaios em transformadores conforme as normas técnicas NBR 5356, NBR 5458 e NBR 5380 descritas neste capítulo.

## Capítulo 4

### Algoritmos Genéticos

#### 4.1 Introdução

Neste capítulo são discutidos alguns métodos de otimização bem como as características, vantagens e deficiências destes métodos. Também é apresentado o Algoritmo Genético com codificação real, que será empregado na estimação de parâmetros do modelo do transformador.

#### 4.2 Métodos de Otimização

Otimização é a busca da melhor solução para um determinado problema. Os diversos métodos de otimização caracterizam-se por encontrar determinada solução para um problema a partir de um ou vários pontos iniciais. Podem-se dividir estes métodos em dois grandes grupos: programação linear e programação não-linear.

A programação linear é um mecanismo de busca empregado na otimização de problemas que são descritos por equações lineares. Deseja-se maximizar (ou minimizar, dependendo da formulação) uma função linear chamada função objetivo, que pode estar sujeita a restrições de igualdades e/ou desigualdades também lineares.

A programação não-linear envolve a busca da solução ótima em problemas que são representados por equações não-lineares. Da mesma forma que na programação linear, a função objetivo está sujeita a restrições de igualdades e/ou desigualdades, porém neste caso não-lineares. Pode-se dividir a programação não-linear em três grandes grupos: métodos determinísticos, estocásticos e enumerativos [19].

Os métodos determinísticos se baseiam no cálculo de derivadas e necessitam de alguma informação do gradiente da função objetivo. Necessitam ainda do passo de cálculo e da direção de busca. Dessa forma, só produzem bons resultados para funções contínuas e



unimodais (funções que possuem um ponto de máximo ou de mínimo). Como exemplo, pode-se citar o método de Newton [20].

Os métodos estocásticos procuram pelo ponto ótimo da função através de regras de probabilidade, necessitando apenas da função objetivo. Não é necessário o cálculo de derivadas. Dentre as técnicas estocásticas, os Algoritmos Genéticos (AGs) se destacam por trabalhar com um conjunto de pontos simultaneamente. Isto agrega robustez a esta técnica, já que em muitos problemas a função a ser maximizada (ou minimizada) tem vários pontos de máximos (ou mínimos) locais. Dessa forma, um conjunto de pontos no espaço de busca dá ao AG maior probabilidade de encontrar a solução global, contudo, a um maior custo computacional se comparado aos métodos determinísticos. Além disso, por sua natureza estocástica, não existe certeza absoluta de que a solução obtida é global. Uma maneira de se assegurar disso consiste em executar o AG diversas vezes e verificar se as soluções obtidas são iguais.

Os métodos enumerativos se caracterizam por encontrar a solução ótima a partir da análise da função objetivo em todos os pontos discretizados do espaço de busca. Dessa forma, todas as possibilidades são verificadas e assegura-se que a solução encontrada é global. Sua implementação é simples, porém, torna-se inviável computacionalmente para espaços de busca muito grandes. Mais informações sobre otimização podem ser encontradas nas referências [19,21].

Como visto, os diversos métodos de programação não-linear têm suas peculiaridades e podem conduzir a soluções diferentes para um mesmo problema. Quanto aos problemas eletromagnéticos, eles geralmente envolvem um grande número de parâmetros contínuos e/ou discretos, são descritos por equações diferenciais não-lineares, e podem ter diversas soluções ótimas locais, sendo apenas uma global. Logo, é importante empregar um método de busca que permita obter precisamente a solução para cada tipo de problema.

Entre os métodos de otimização aplicáveis ao problema em foco neste trabalho, os métodos determinísticos conduzem à solução ótima de forma rápida. Contudo são apenas aplicáveis a funções contínuas, necessitam de cálculo de derivadas, e em casos multimodais, podem convergir para um ponto ótimo local, porém não global. Os métodos enumerativos asseguram a obtenção da solução global, porém a um custo computacional elevado. Já os métodos estocásticos procuram pela solução ótima em um espaço de busca que pode conter não-linearidades, descontinuidades e diversos pontos ótimos locais.

Os AGs vêm ganhando espaço entre os métodos de otimização utilizados na solução de problemas em engenharia [13,14,22,23], principalmente devido ao avanço dos recursos computacionais disponíveis e vantagens inerentes aos métodos estocásticos (são menos susceptíveis a convergir para máximos ou mínimos locais). Com base no que foi exposto, optou-se pelos AGs como método de busca utilizado neste trabalho.

### 4.3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs), por sua natureza estocástica, são métodos que apresentam bom desempenho na maioria dos problemas, muitos dos quais não podem ser tratados de maneira simples ou eficiente com métodos determinísticos.

Os AGs se baseiam na lei da evolução dos seres vivos num ambiente de competição pela sobrevivência, onde os indivíduos mais aptos têm maiores chances de se reproduzir e gerar descendentes para a geração seguinte. Em termos matemáticos, vetores de parâmetros formam os indivíduos da população. Inicialmente, estes vetores são gerados aleatoriamente dentro de um espaço restrito, chamado de espaço de parâmetros. Os indivíduos são então avaliados por uma função de mérito, ou função objetivo, com o intuito de atribuir uma avaliação (aptidão) para cada indivíduo da iteração corrente (geração). A figura 4.1 ilustra um exemplo de como o processo se inicia. Um conjunto de indivíduos  $I$  contém três indivíduos formados pelos vetores de parâmetros  $[x_n, y_n]$ ,  $n = 1,2,3$ . Cada um dos elementos de  $I$  é uma possível solução para o problema. Esta população de indivíduos é gerada aleatoriamente dentro do espaço dos parâmetros e então avaliada pela função objetivo  $F$ , resultando num conjunto de aptidões  $A$ .

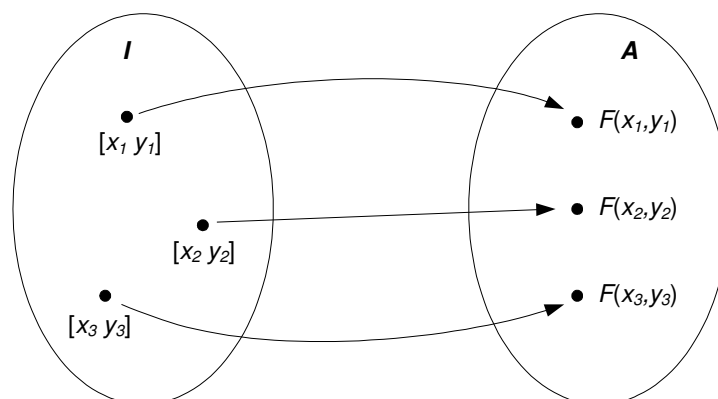
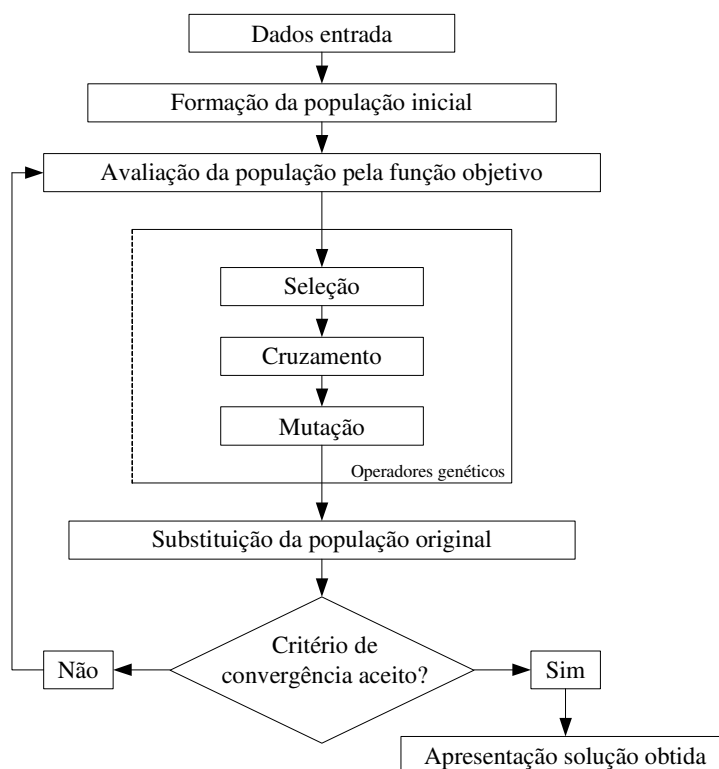


Figura 4.1 – Exemplo de processo de início do AG.

Por ser formado por dois parâmetros, cada indivíduo está localizado num espaço de parâmetros bidimensional. Como existe uma única aptidão associada a cada indivíduo, o conjunto de aptidões  $A$  forma o espaço unidimensional chamado espaço de aptidões, ou espaço dos objetivos. Existe uma meta a ser alcançada: a maximização, ou minimização, de uma única função objetivo. Neste caso, a otimização é dita monoobjetivo.

Após a formação do conjunto de aptidões  $A$ , os indivíduos da população  $I$  são então submetidos aos chamados operadores genéticos. Os AGs comumente utilizam três operadores: seleção, cruzamento e mutação. A função destes operadores é provocar uma mudança nos valores dos parâmetros que constituem os indivíduos com o intuito de melhorar a aptidão da população. As ações dos operadores cruzamento e mutação ocorrem de acordo com valores de probabilidades estabelecidos inicialmente. O conjunto de indivíduos resultante da ação dos operadores genéticos substitui em parte, ou totalmente, a população original, dando assim início a uma nova geração de indivíduos. O processo de busca pelo melhor indivíduo no decorrer das sucessivas gerações termina quando algum critério de convergência pré-determinado for satisfeito. A figura 4.2 ilustra o fluxograma de um AG.



**Figura 4.2 – Fluxograma de um AG.**

Antes da formação da população inicial, o AG necessita de dados tais como os limites das variáveis do problema, o número de indivíduos e de gerações, critério de convergência, valores de probabilidade de cruzamento e mutação, entre outros. Estes dados serão descritos ao longo deste capítulo.

Os parâmetros que formam os indivíduos são codificados de forma a adequá-los à ação dos operadores genéticos. Há dois tipos de codificação: discreta e contínua. Entre as codificações discretas, a binária foi a primeira a ser explorada devido à sua analogia com a genética [24]. Nesta codificação, os parâmetros que formam os indivíduos são representados por números binários [25]. O número de bits que representa cada parâmetro do indivíduo pode variar de acordo com o intervalo entre os limites do parâmetro e a precisão requerida. Nesse caso, quando a faixa de variação dos parâmetros dos indivíduos é grande, é necessário um grande número de bits para representar as variáveis com boa precisão. Ainda mais, é necessário converter os números binários para decimais para avaliar a aptidão do indivíduo através da função objetivo. Isso pode requerer um tempo computacional excessivo quando o número de indivíduos da população é grande.

Na codificação contínua, os parâmetros dos indivíduos são representados por números reais, não necessitando qualquer conversão para avaliação da aptidão do indivíduo. A codificação real é a escolha mais natural quando se lida com variáveis reais. As equações 4.1 e 4.2 apresentam exemplos de indivíduos com codificação binária e real, respectivamente, onde  $nvar$  é o número de variáveis de  $I_1$  e  $I_2$ .

$$I_1 = [10110011 \quad 01110 \quad \dots \quad P_{nvar}] \quad (4.1)$$

$$I_2 = [1,6223 \quad 221,0032 \quad \dots \quad P_{nvar}] \quad (4.2)$$

Neste trabalho, as variáveis a serem codificadas são os valores dos parâmetros do modelo do transformador. Estas variáveis apresentam valores contínuos. Por isso, a codificação real é a escolha mais adequada. O AG utilizado neste trabalho emprega codificação real.

Os operadores genéticos são responsáveis pela formação de novos indivíduos que aumentem a aptidão da população, assim explorando o espaço de busca à procura da melhor solução. Os operadores seleção, cruzamento e mutação são descritos a seguir.

### 4.3.1 Seleção

Este operador genético tem o objetivo de selecionar indivíduos do conjunto  $I$  e agrupá-los em pares. O critério de escolha varia conforme o método de seleção empregado, porém o princípio é o mesmo para todos os métodos: os indivíduos com melhores aptidões têm maior probabilidade de serem escolhidos.

Há vários métodos de seleção. Entre os principais estão o Método da Roleta e o Método do Torneio. No Método da Roleta, a probabilidade de um indivíduo ser selecionado é igual à relação entre sua aptidão e a soma das aptidões de todos os indivíduos da população. A figura 4.3a ilustra um exemplo. A roleta está dividida em oito partes, cada uma representando a aptidão de um indivíduo, em porcentual, relativa à soma das aptidões dos oito indivíduos de uma população  $I$ . A roleta é então girada tantas vezes quantas forem necessárias até obter um determinado número de pares de indivíduos.

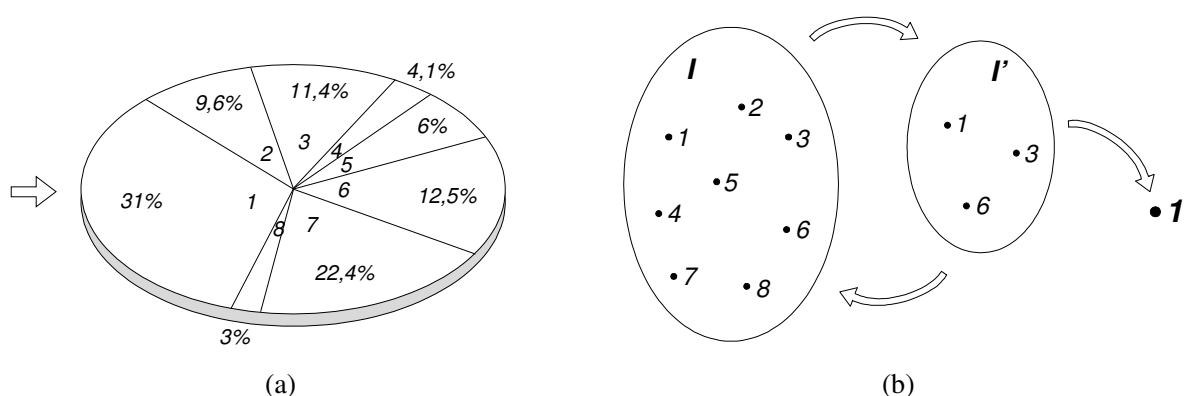


Figura 4.3 – Métodos de seleção: (a) Roleta; (b) Torneio.

A figura 3b ilustra um exemplo do Método do Torneio. Neste método, indivíduos da população  $I$  são selecionados pelo Método da Roleta para formar a subpopulação  $I'$ . O indivíduo com a maior aptidão do subconjunto  $I'$  vence o torneio e se torna o selecionado. Os outros indivíduos de  $I'$  retornam à população  $I$ .

Em ambos os métodos de seleção descritos, nota-se que indivíduos com maior aptidão têm maiores chances de serem selecionados. Porém, isso não impede que indivíduos menos aptos também sejam selecionados. Dessa forma, indivíduos de baixo desempenho têm chances de formar pares, assim preservando o material genético (parâmetros) contido neles.

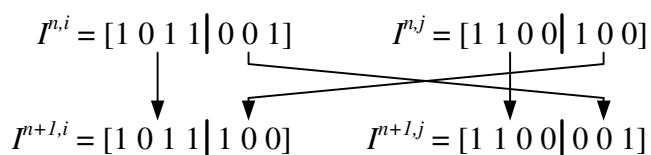
O número de indivíduos selecionados varia de acordo com o tipo de AG escolhido. Segundo Soares [19], há três tipos de AGs. Quando o número de indivíduos selecionados é igual ao tamanho da população original, o AG é do tipo SGA (*Simple Genetic Algorithm*). Neste caso, a população selecionada sofrerá ação dos operadores cruzamento e mutação e irá substituir inteiramente a população original. No RGA (*Replacement Genetic Algorithm*) e no SSGA (*Steady State Genetic Algorithm*), o número de indivíduos selecionados é menor que o tamanho da população original, sendo apenas um par para o RGA. Com isso, em ambos RGA e SSGA, parte da população original permanecerá intacta para a geração seguinte, assim aproveitando-se da riqueza da população. A referência [19] apresenta resultados comparativos entre os três tipos de AGs.

Após a seleção de indivíduos, os pares formados são então submetidos ao operador cruzamento.

#### 4.3.2 Cruzamento

O cruzamento permite a troca de material genético entre os indivíduos selecionados. Este evento ocorre entre os elementos dos pares de acordo com um valor de probabilidade definido como probabilidade de cruzamento  $p_{cruz}$ . Este operador é o principal responsável pela criação de novos pontos no universo de busca. Portanto, o valor de  $p_{cruz}$  deve ser alto. Geralmente, é estipulado entre 70% e 100%.

Há diversos métodos de cruzamento [19]. A figura 4.4 ilustra um exemplo de cruzamento com um ponto de corte (traço) e codificação binária.  $I^{n,i}$  e  $I^{n,j}$  são indivíduos (“pais”) compostos por um parâmetro de 7 bits cada, e  $I^{n+1,i}$  e  $I^{n+1,j}$  são os indivíduos (“filhos”) resultantes do cruzamento.



**Figura 4.4 – Exemplo de cruzamento com codificação binária.**

O cruzamento com codificação real é diferente, embora tenha o mesmo princípio, do cruzamento com codificação binária. As equações 4.3 e 4.4 apresentam a forma como

os “filhos” com codificação real são determinados a partir do material genético contido nos “pais”.

$$X_{k_{cruz}...dir}^{n+1,i} = \alpha_{pol} X_{k_{cruz}...dir}^{n,i} + (1 - \alpha_{pol}) X_{k_{cruz}...dir}^{n,j} \quad (4.3)$$

$$X_{k_{cruz}...dir}^{n+1,j} = (1 - \alpha) X_{k_{cruz}...dir}^{n,i} + \alpha X_{k_{cruz}...dir}^{n,j} \quad (4.4)$$

A implementação do operador cruzamento com codificação real apresentada aqui é baseada na referência [24]. Nas equações 4.3 e 4.4,  $k_{cruz}$  é um número inteiro aleatório com distribuição uniforme no intervalo  $1 \leq k_{cruz} \leq nvar$  que define o ponto de corte para o cruzamento;  $X_{k_{cruz}...dir}^{n+1,i}$  representa a porção do indivíduo  $i$  que inclui as variáveis de  $X_{k_{cruz}...dir}^{n+1,i}$  até  $X_{dir}^{n+1,i}$ ;  $dir$  indica em que direção será realizado o cruzamento;  $\alpha_{pol}$  é o coeficiente de multiplicação polarizado, fixado em 0,9; e  $\alpha$  é o coeficiente de multiplicação aleatório, com distribuição uniforme no intervalo  $-0,1 \leq \alpha \leq 1,1$ .

As equações 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam um exemplo de cruzamento com codificação real, onde:  $I^{n,i}$  e  $I^{n,j}$  são “pais”, compostos por quatro parâmetros cada;  $I^{n+1,i}$  e  $I^{n+1,j}$  são os “filhos” resultantes do cruzamento, também com quatro parâmetros cada;  $k_{cruz} = 2$ ;  $dir = 4$ ;  $\alpha_{pol} = 0,9$ ; e  $\alpha = 0,5$ . O indivíduo  $I^{n,i}$  tem mérito maior que o indivíduo  $I^{n,j}$ .

$$I^{n,i} = [1 \quad 4 \mid 2 \quad 7] \quad I^{n,j} = [7 \quad 2 \mid 6 \quad 1] \quad (4.5)$$

$$I^{n+1,i} = [1 \quad 4] \cup 0,9 \times [2 \quad 7] + 0,1 \times [6 \quad 1] = [1 \quad 4 \quad 2,4 \quad 6,4] \quad (4.6)$$

$$I^{n+1,j} = [7 \quad 2] \cup 0,5 \times [2 \quad 7] + 0,5 \times [6 \quad 1] = [7 \quad 2 \quad 4 \quad 4] \quad (4.7)$$

O intuito deste cruzamento polarizado modificado [24] é produzir “filhos” que estejam mais próximos do “pai” de melhor aptidão no espaço de busca. Isto é essencial para a evolução da população. Este método de cruzamento com codificação real será o empregado neste trabalho.

Após o cruzamento, os novos indivíduos formados são submetidos ao operador genético de mutação.

### 4.3.3 Mutaç o

A muta o tem o objetivo de inserir material gen tico novo atrav s de mudan a nos valores dos par metros dos indiv duos. Neste processo, ainda h  possibilidades de restaura o de material gen tico perdido durante a sele o, no cruzamento e na pr pria muta o [19]. Na codifica o bin ria, a muta o   realizada bit a bit de acordo com uma dada probabilidade ( $p_{mut}$ ). Para n o tornar a busca puramente aleat ria, a probabilidade de muta o deve ser baixa. Geralmente,   estipulada entre 0 e 5%. A figura 4.5 ilustra um exemplo de muta o com codifica o bin ria. O indiv duo  $I^{n+1,i}$  resultante do cruzamento (figura 4.4) sofreu muta o em seu sexto bit, tornando-se o indiv duo modificado  $I^{n+2,i}$ .

$$I^{n+1,i} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ \underline{0} \ 0] \quad I^{n+2,i} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ \underline{1} \ 0]$$

**Figura 4.5 – Exemplo de muta o com codifica o bin ria.**

Na codifica o real, a muta o consiste em somar ou subtrair do indiv duo um vetor de perturba o, conforme a equa o 4.8,

$$\gamma_{k_{mut}...dir}^{n,i} = 0,05\beta range_{k_{mut}...dir}^{n,i} \quad (4.8)$$

onde  $k_{mut}$    um n mero inteiro aleat rio com distribui o uniforme no intervalo  $1 \leq k_{mut} \leq nvar$  que define o ponto de corte para a muta o;  $dir$  indica em que dire o ser  realizada a muta o;  $\beta$    um n mero aleat rio com distribui o uniforme no intervalo  $0 \leq \beta \leq 1$  e  $range$    a amplitude do intervalo entre os limites m nimo e m ximo de cada vari vel.

A figura 4.6 apresenta um exemplo de muta o com codifica o real, na qual o indiv duo  $I^{n+1,i}$  resultante do cruzamento (equa o 4.6) sofreu muta o em seus dois  ltimos par metros, tornando-se o indiv duo modificado  $I^{n+2,i}$ .

$$I^{n+1,i} = [1 \ 4 \ \underline{2,4} \ \underline{6,4}] \quad I^{n+2,i} = [1 \ 4 \ \underline{2,53} \ \underline{6,81}]$$

**Figura 4.6 – Exemplo de muta o com codifica o real.**



Num determinado ponto do processo evolutivo é interessante fazer com que o vetor de perturbação seja modificado e passe a depender do valor médio das variáveis que sofrerão mutação. Isso leva a uma diminuição da amplitude das perturbações, permitindo uma localização mais precisa da solução. O vetor de perturbação passa então a ser dado pela equação 4.9.

$$\gamma_{kmut\dots dir}^{n,i} = 0,05\beta \frac{\sum_{i=1}^{npop} X_{kmut\dots dir}^{n,i}}{npop} \quad (4.9)$$

onde  $npop$  é o número de indivíduos da população. A implementação do operador mutação com codificação real apresentada aqui é baseada na referência [24].

A população modificada pelos operadores cruzamento e mutação substitui a população original, dando origem a uma nova geração. Neste ponto é verificado o critério de convergência.

#### 4.3.4 Critérios de Convergência

Há diversas opções para o critério de convergência. Pode-se optar por um número máximo de gerações e/ou de verificações da função objetivo. Outro critério para testar a convergência é através da diversidade genética da população [19], em que se analisa a aptidão média da população  $f_{med}$  e a do melhor indivíduo  $f_{max}$  no decorrer do processo evolutivo. Quando  $f_{med}$  tender a  $f_{max}$ , a população encontra-se homogênea e não há mais diversidade genética a ser explorada, podendo-se então interromper o processo evolutivo. Quando a aptidão é conhecida, também se pode optar pelo erro máximo admissível.

Todas estas opções para o critério de parada do processo têm suas limitações. O número máximo de gerações e/ou de verificações da função objetivo falha quando não há tempo suficiente para o AG investigar todo o universo de busca. A convergência por diversidade genética falha quando os AGs convergem para um ótimo local. A melhor opção é executar o AG diversas vezes e observar seu comportamento perante o problema, ou seja, obter conhecimento sobre a operação do AG no problema analisado e, a partir da experiência adquirida, optar por um critério de parada apropriado.

### 4.3.5 Técnicas para Aceleração da Convergência dos AGs

O objetivo do AG é obter a solução ótima global da forma mais rápida possível. Com o intuito de acelerar a busca e evitar a convergência para um ótimo local, foram agregadas técnicas de aceleração de convergência aos AGs. O escalonamento, a variação dinâmica das probabilidades, o elitismo e a redução do espaço de busca estão entre algumas das técnicas [19].

O escalonamento tem o objetivo de limitar a quantidade de vezes que um indivíduo de aptidão elevada (comparado aos outros da população) é selecionado no método da Roleta. Isso reduz a probabilidade de convergência para uma solução ótima local [19].

A variação dinâmica das probabilidades de cruzamento  $p_{cruz}$  e mutação  $p_{mut}$  durante o processo evolutivo também tem o objetivo de reduzir a possibilidade de convergência para uma solução ótima local. Esta técnica se baseia na medida da diversidade genética  $m_{dg}$  dada pela relação entre a aptidão média da população  $f_{med}$  e a do melhor indivíduo  $f_{max}$ . Quando  $m_{dg}$  for pequena, há muita diversidade genética (muitos indivíduos diferentes). Nesse caso,  $p_{cruz}$  cresce para aumentar a troca de material genético entre os indivíduos e  $p_{mut}$  diminui para barrar a inserção de novo material genético na população. Quando  $m_{dg}$  tender a unidade, há pouca diversidade genética (muitos indivíduos semelhantes). Nesse caso,  $p_{cruz}$  diminui e  $p_{mut}$  aumenta. O ideal é ter diversidade genética suficiente na população para que regiões diferentes daquela do melhor indivíduo também sejam exploradas.

O elitismo é uma das técnicas mais importantes para aceleração da convergência. Há dois tipos de elitismo: simples e global [24]. No elitismo simples o melhor indivíduo de uma determinada geração é salvo e, caso não apareça um melhor na geração seguinte, ele então retorna à população. O elitismo global consiste em analisar a aptidão dos indivíduos que sofreram ação dos operadores genéticos, e somente aqueles que melhorarem a aptidão média da população retornam a ela.

A redução do espaço de busca é uma técnica empregada durante o processo evolutivo. Consiste em diminuir o intervalo em que cada parâmetro pode variar, permitindo explorar um espaço pequeno em torno da melhor solução encontrada até o momento. Na ocasião da redução é criada aleatoriamente uma nova população dentro do espaço de busca reduzido. Esta técnica deve ser empregada no fim do processo evolutivo,

em que a melhor solução encontrada é ou está próxima da solução global, caso contrário, o AG pode convergir para um ótimo local.

Estas técnicas de aceleração da convergência serão aplicadas neste trabalho, com exceção do escalonamento, empregado apenas quando o método de seleção é o da Roleta. A seguir, serão apresentados dois exemplos de aplicação dos AGs.

#### 4.3.6 Exemplos de Otimização Usando AGs

Serão apresentados nesta seção dois exemplos de otimização utilizando o AG com codificação real. O primeiro exemplo é uma simples demonstração visual de funcionamento dos AGs. O segundo está relacionado ao problema proposto neste trabalho: a estimação de parâmetros através do ajuste de curvas.

##### 4.3.6.1 Função com Máximos e Mínimos

Para apresentar visualmente o funcionamento de um AG, optou-se pela maximização da equação 4.10 com a variável  $x$  no intervalo  $[0,3]$ .

$$f(x) = \text{sen}(2\pi x) + \text{sen}\left(\frac{2}{3}\pi x - \frac{\pi}{2}\right) + 2 \quad (4.10)$$

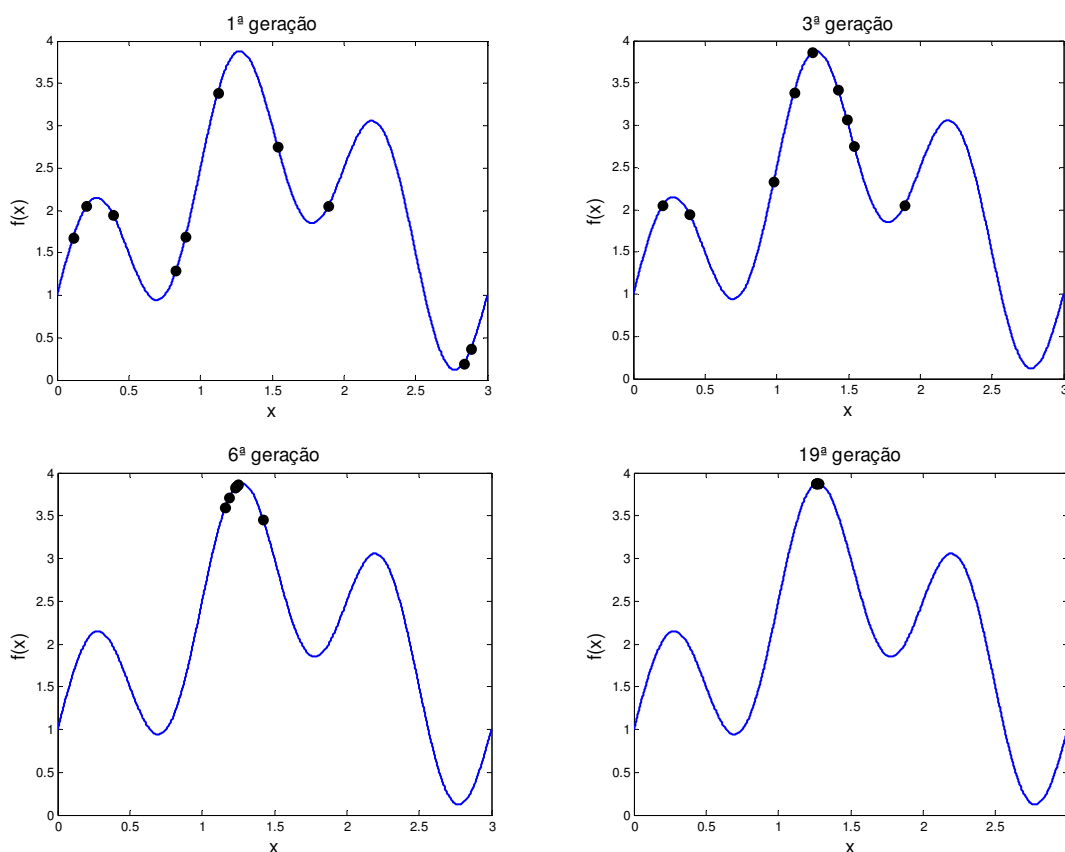
Os dados de entrada para o AG são os seguintes:

- Número de indivíduos: 10;
- Probabilidade de cruzamento: 90%;
- Probabilidade de mutação: 5%;
- Método de seleção: torneio;
- Tipo de AG: SGA (*Simple Genetic Algorithm*);
- Critério de parada: número máximo de gerações igual a 25;
- Técnicas para aceleração da convergência: variação dinâmica das probabilidades, redução do espaço de busca, elitismo global.

A figura 4.7 ilustra a função objetivo a ser maximizada e a distribuição dos indivíduos no espaço de busca  $x \in [0,3]$  em quatro gerações: 1ª, 3ª, 6ª e 19ª. A função possui vários pontos de mínimo e de máximo, com o ponto máximo global em  $x = 1,274$ .

Há apenas uma variável, logo o espaço de busca é unidimensional, e cada indivíduo é composto por um único parâmetro com codificação real.

Na primeira geração os dez indivíduos estão distribuídos aleatoriamente dentro do espaço de busca. No decorrer do processo evolutivo sofrem ação dos operadores genéticos até se concentrarem em torno do ponto ótimo. A convergência ocorreu no 19ª geração.



**Figura 4.7 – Função objetivo e distribuição dos indivíduos ao longo das gerações.**

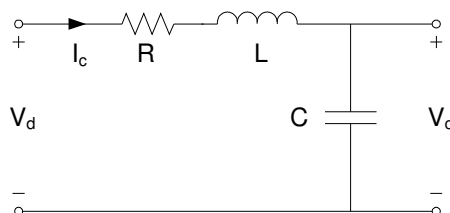
O AG foi executado 30 vezes. Em 28 delas, convergiu para o ponto de máximo global  $x = 1,274$ , e em 2 vezes convergiu para o máximo local  $x = 2,195$ . Isto demonstra a necessidade de verificação de eficiência na convergência através de múltiplas execuções.

#### 4.3.6.2 Ajuste de Curvas

Um dos objetivos deste trabalho é a estimação dos parâmetros do modelo do transformador. Para isso, o AG descrito neste capítulo será empregado na minimização da diferença entre as curvas experimentais (de referência) obtidas em ensaios e as curvas simuladas por modelos. Este procedimento é chamado ajuste de curvas (do inglês *curve*

*fitting*). O exemplo a seguir tem o objetivo de apresentar as características desse tipo de problema e demonstrar a eficiência do AG como ferramenta de determinação de parâmetros de modelos elétricos.

A figura 4.8 apresenta um sistema linear de segunda ordem composto por um resistor R, um indutor L e um capacitor C. O objetivo é a aplicação do AG na estimação destes parâmetros através da análise da resposta ao degrau do sistema.



**Figura 4.8 – Sistema linear de segunda ordem.**

O sistema é modelado por uma equação diferencial de segunda ordem (equação 4.11). Para a simulação da resposta ao degrau são empregadas as aproximações (baseadas em diferenças finitas) dadas pelas equações 4.12-4.15,

$$LC \frac{d^2V_C(t)}{dt^2} + RC \frac{dV_C(t)}{dt} + V_C(t) = V_d(t) \quad (4.11)$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} \approx \frac{V_C(t) - V_C(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4.12)$$

$$\frac{d^2V_C(t)}{dt^2} \approx \frac{V_C(t) - 2V_C(t - \Delta t) + V_C(t - 2\Delta t)}{\Delta t^2} \quad (4.13)$$

$$V_C(t) \approx \frac{V_d(t) + \left(\frac{RC}{\Delta t} + \frac{2LC}{\Delta t^2}\right)V_C(t - \Delta t) - \frac{LC}{\Delta t^2}V_C(t - 2\Delta t)}{1 + \frac{RC}{\Delta t} + \frac{LC}{\Delta t^2}} \quad (4.14)$$

$$I_C(t) \approx C \frac{V_C(t) - V_C(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4.15)$$

onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre dois pontos das curvas (passo de cálculo). As equações 4.14 e 4.15 descrevem a resposta do sistema como função dos parâmetros estimados pelo AG, do passo de cálculo e da entrada  $V_d(t)$ .

O problema de ajuste de curvas tem um grau de dificuldade superior se comparado ao exemplo simples descrito na seção 4.3.6.1. Neste tipo de problema ficou constatado que

um número grande de indivíduos é essencial para a convergência. Os dados de entrada para o AG são os seguintes:

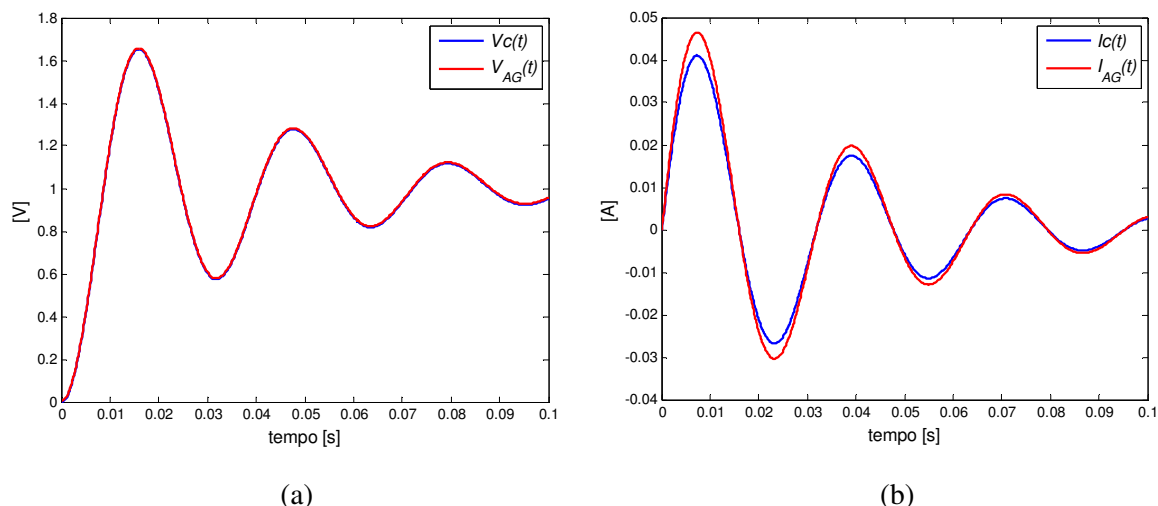
- Número de indivíduos: 1000;
- Probabilidade de cruzamento: 90%;
- Probabilidade de mutação: 5%;
- Método de seleção: torneio;
- Tipo de AG: SGA (*Simple Genetic Algorithm*);
- Critério de parada: número máximo de gerações igual a 20;
- Técnicas para aceleração da convergência: variação dinâmica das probabilidades, redução do espaço de busca, elitismo global.

O AG foi executado duas vezes, nomeadas Execução #1 e Execução #2. Na primeira os parâmetros foram estimados através da minimização da função objetivo dada pela equação 4.16,

$$E = \sum_{n=1}^N \frac{(V_C(n) - V_{AG}(n))^2}{|V_C(n)|} \quad (4.16)$$

onde  $V_C(n)$  é a curva de referência obtida com parâmetros de referência,  $V_{AG}(n)$  é a curva simulada pelo AG utilizando os parâmetros estimados e  $N$  é o número de pontos. O objetivo é então a estimação de parâmetros que minimizem a diferença entre as curvas de tensão (minimização dos quadrados dos resíduos).

Para a Execução #1, a curva de referência é a resposta  $V_C(t)$  do sistema ao degrau com amplitude  $V_d(t) = 1V$  aplicado no instante  $t = 0$ . A figura 4.9a mostra a resposta ao degrau do sistema quando os parâmetros são os de referência. Os valores destes parâmetros estão apresentados na tabela 4.1.



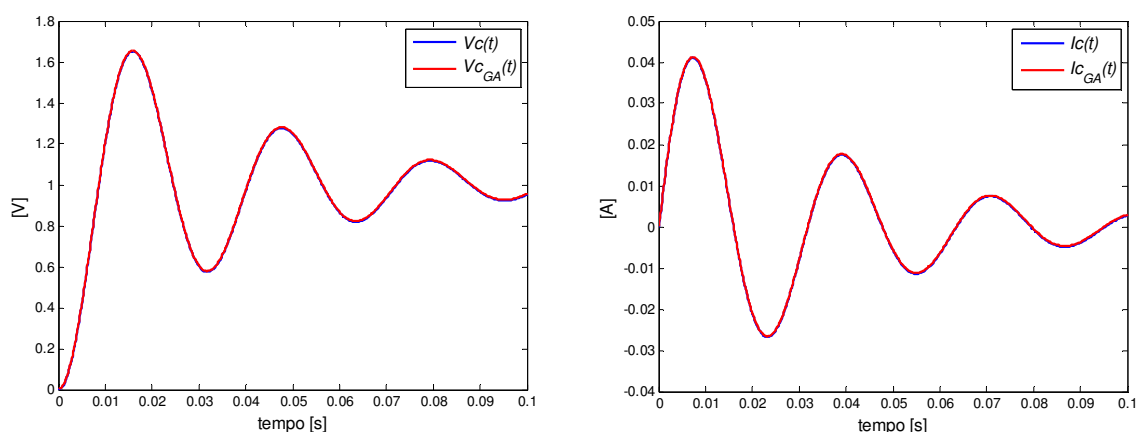
**Figura 4.9 – Curvas de referência  $V_C(t)$  e  $I_C(t)$  e curvas  $V_{AG}(t)$  e  $I_{AG}(t)$  obtidas com parâmetros estimados pelo AG na Execução #1.**

A figura 4.9a também mostra a curva  $V_{AG}(t)$  simulada utilizando os parâmetros estimados. Pode-se observar que as curvas de referência e simulada são praticamente iguais, indicando que o AG convergiu para um ponto ótimo. Os parâmetros estimados pelo AG na Execução #1 estão apresentados na tabela 4.1, juntamente com as diferenças percentuais relativas aos parâmetros de referência. Nota-se que, apesar das curvas de tensões estarem de acordo, os parâmetros estimados tem diferenças superiores a 10% se comparados aos de referência. Pode-se observar isso na figura 4.9b, na qual a curva de corrente  $I_{AG}(t)$  simulada com parâmetros estimados é diferente da curva de referência  $I_C(t)$  simulada com os parâmetros de referência. Apesar de o AG ter obtido uma solução que minimize a diferença entre as curvas de tensão, o mesmo não acontece com as curvas de corrente. Pode-se então concluir que há um conjunto de soluções ótimas para a minimização da função objetivo 4.16. De fato, o AG foi executado diversas vezes e em todas houve convergência, porém com diferentes soluções encontradas. Isto indica a existência de soluções ótimas locais.

Com o intuito de estimar parâmetros iguais aos de referência, na Execução #2 foi modificada a função objetivo, dada agora pela equação 4.17.

$$E = \sum_{n=1}^N \left( \frac{(V_C(n) - V_{AG}(n))^2}{|V_C(n)|} + \frac{(I_C(n) - I_{AG}(n))^2}{|I_C(n)|} \right) \quad (4.17)$$

Na Execução #2 o objetivo é a minimização dos quadrados dos resíduos de tensão e corrente. A figura 4.10 mostra as curvas de referência  $V_C(t)$  e  $I_C(t)$  (resposta ao degrau de amplitude  $V_d(t) = 1V$  aplicado no instante  $t = 0$ ) e as curvas  $V_{AG}(t)$  e  $I_{AG}(t)$  simuladas utilizando os parâmetros estimados pelo AG. Pode-se observar que as curvas de referência e simuladas são praticamente iguais, indicando que o AG convergiu para o ponto ótimo global. Os parâmetros estimados pelo AG na Execução #2 estão apresentados na tabela 4.1, juntamente com as diferenças percentuais relativas aos parâmetros de referência.



**Figura 4.10 - Curvas de referência  $V_C(t)$  e  $I_C(t)$  e curvas  $V_{AG}(t)$  e  $I_{AG}(t)$  obtidas com parâmetros estimados pelo AG na Execução #2.**

**Tabela 4.1 – Parâmetros de referência e estimados pelo AG.**

	Referência	Execução #1		Execução #2	
		Estimado	Diferença [%]	Estimado	Diferença [%]
R [ $\Omega$ ]	5	4,4165	11,670	5,0005	0,010
L [mH]	100	88,3285	11,672	99,9991	0,001
C [ $\mu$ F]	250	283,0338	13,214	249,9997	0,000

Com base no que foi exposto, pode-se concluir que o problema de ajuste de curvas apresenta um conjunto de soluções ótimas locais (Execução #1), mas uma única solução global (Execução #2). Para encontrar tal solução, é necessário formular adequadamente a função objetivo para que os parâmetros obtidos modelam corretamente o comportamento do sistema.



O AG foi executado 30 vezes e em todas houve convergência para a solução global. Este exemplo simples demonstrou a eficiência do AG com codificação real empregado neste trabalho.

#### **4.4 Conclusão**

Neste capítulo foram apresentadas as características, vantagens e desvantagens dos métodos de otimização. Cada problema tem suas particularidades e, por este motivo, a aplicação de um método de otimização apropriado é fundamental para obter a solução.

Os métodos determinísticos, apesar de rápidos se comparados aos demais métodos, só produzem bons resultados para funções contínuas e que possuam um único ponto de máximo ou de mínimo. Os métodos enumerativos permitem obter a solução global, porém a um custo computacional elevado. Já os métodos estocásticos procuram pela solução ótima em um espaço de busca que pode conter não-linearidades, descontinuidades e diversos pontos ótimos locais. Baseado nisto, o AG foi empregado como método estocástico de otimização neste trabalho.

Com os exemplos apresentados, pôde-se observar o comportamento do AG quando aplicado em alguns problemas de otimização. Por sua natureza estocástica, não existe certeza absoluta de que a solução obtida é global, por este motivo o AG deve ser executado diversas vezes para verificar se as soluções obtidas são iguais e assegurar-se de que a solução global foi determinada.

No capítulo seguinte são apresentados os procedimentos adotados bem como os resultados obtidos nos ensaios em transformadores conforme as normas técnicas, utilizando instrumentação convencional. Em seguida, o AG será empregado na estimação de parâmetros do modelo do transformador utilizando dados de ensaios obtidos com instrumentação convencional e não-convencional.

# Capítulo 5

## Modelo com Parâmetros Constantes

### 5.1 Introdução

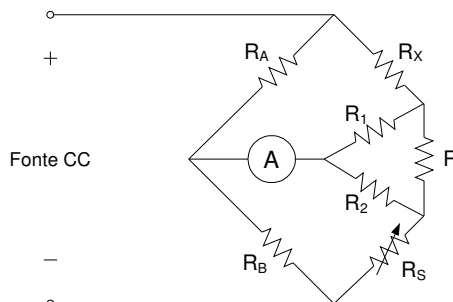
Neste capítulo será apresentado o modelo convencional do transformador obtido a partir dos resultados dos ensaios conforme as normas técnicas descritas no capítulo 3. Estes ensaios foram realizados empregando instrumentação convencional. Em seguida, são apresentados métodos para obtenção do modelo a partir de resultados de ensaios realizados utilizando instrumentação não-convencional e da aplicação do Algoritmo Genético para a estimação dos parâmetros.

### 5.2 Ensaio dos Transformadores Conforme as Normas

Nesta seção são apresentados os procedimentos e resultados obtidos nos ensaios convencionais conforme as normas técnicas da ABNT. O anexo A contém os dados de placa e informações adicionais relativas aos dois transformadores submetidos aos ensaios. Daqui para frente, eles serão designados como transformador 1 e transformador 2.

#### 5.2.1 Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos Conforme a NBR 5380

Para a medida da resistência elétrica dos enrolamentos em corrente contínua, a norma propõe o uso do método da queda de tensão ou de um método de ponte. Caso a corrente nominal do enrolamento seja inferior a 1A, deve ser utilizado um método de ponte. Optou-se pelo método da Ponte de Kelvin, que é uma versão modificada da Ponte de Wheatstone, mas menos sensível aos efeitos das resistências de contato. Desta forma, a Ponte de Kelvin permite uma medida precisa de resistências muito baixas, como a dos enrolamentos de máquinas elétricas. A figura 5.1 apresenta o circuito da Ponte de Kelvin.



**Figura 5.1 – Ponte de Kelvin.**

A relação entre  $R_A$  e  $R_B$  é igual à relação entre  $R_1$  e  $R_2$ . O ajuste de  $R_S$  permite o equilíbrio da ponte, que acontece quando a corrente medida pelo galvanômetro  $A$  for nula. Com isso,  $R_X$  é determinada da mesma forma que pelo método da Ponte de Wheatstone.

O instrumento de medida utilizado no ensaio foi o microohmímetro digital Megabras MPK-200. Este instrumento emprega o método da Ponte de Kelvin. Na tabela 5.1 estão apresentados os resultados das medidas realizadas nos enrolamentos primário e secundário dos transformadores 1 e 2. A escala utilizada em todas as medidas foi de 2000m $\Omega$  com corrente de 100mA.

**Tabela 5.1 – Resistências elétricas dos enrolamentos medidas em corrente contínua.**

Transformador 1		Transformador 2	
Primário 220V	Secundário 127V	Primário 220V	Secundário 220V
1942m $\Omega$	858m $\Omega$	658m $\Omega$	607m $\Omega$

O transformador 1 tem um enrolamento primário com um número maior de espiras e fios com bitola inferior aos do enrolamento secundário, o que explica uma resistência de enrolamento superior. O transformador 2 tem um enrolamento primário semelhante ao secundário, com mesmo número de espiras e fios com bitolas iguais. Entretanto, a resistência elétrica do enrolamento primário é ligeiramente superior à do secundário pois seus terminais estão conectados ao enrolamento por um cabo com 1,2m de comprimento.

No momento do ensaio a temperatura ambiente era de aproximadamente 24°C. Esta temperatura foi considerada como a temperatura dos enrolamentos, já que os transformadores ficaram desenergizados nesta temperatura nas 12 horas anteriores ao ensaio.

### 5.2.2 Ensaio de Perdas em Vazio e Corrente de Excitação Conforme a NBR 5380

Para medir as perdas em vazio, os transformadores 1 e 2 foram ensaiados utilizando o esquema de ligações da figura 3.1. A norma estabelece que essas perdas devem ser referidas à tensão senoidal pura, com fator de forma 1,11. Para isso, foi utilizado um voltímetro de valor eficaz e um voltímetro de valor médio (graduado em valor eficaz) para a análise da tensão de alimentação. O anexo A contém informações sobre os instrumentos convencionais utilizados. Foi empregada uma fonte de tensão monofásica de intensidade variável como fonte de alimentação. A tensão foi aumentada gradualmente, desde o valor nulo até o valor nominal do transformador, tomando como referência a leitura do voltímetro de valor médio. Como sugerido pela norma, foram alimentados o enrolamento de baixa tensão do transformador 1 (127V) e o enrolamento primário (220V) do transformador 2. Os valores medidos pelos instrumentos convencionais encontram-se na tabela 5.2, já corrigidos devido à carga destes instrumentos.

**Tabela 5.2 – Medidas do ensaio de perdas em vazio.**

	Transformador 1	Transformador 2
Tensão média [V]	114,4	198,2
Tensão eficaz [V]	128,0	224,0
Corrente eficaz [A]	0,282	0,600
Potência [W]	13,0	32,5
Fator de forma	1,119	1,130

A tabela 5.2 também inclui o fator de forma da tensão de alimentação do ensaio de ambos os transformadores. Observa-se que seus valores são diferentes de 1,11, o que indica uma forma de onda de tensão de alimentação distorcida. Verificado isto, a norma prescreve que deve ser aplicada uma correção no valor medido das perdas para referi-las à tensão senoidal pura. Utilizando a equação 3.3 com valores típicos de 50% para  $W_h$  e  $W_f$  propostos pela norma, obtém-se as perdas referidas apresentadas na tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Perdas em vazio medidas ( $W_E$ ) e referidas à tensão senoidal pura ( $W_S$ ).**

	Transformador 1	Transformador 2
$W_E$ [W]	13,000	32,500
$W_S$ [W]	12,896	31,915

Conforme a correção proposta pela norma, as perdas em vazio referidas à tensão senoidal pura são ligeiramente inferiores às perdas medidas. Antes de continuar, é necessário mencionar que as leituras de corrente e potência foram realizadas no início da escala dos instrumentos, o que pode ocasionar imprecisões de leitura. Isto ocorreu porque os valores a serem medidos eram bem menores que os valores de fim de escala, mesmo nas menores escalas disponíveis.

No ensaio para medição da corrente de excitação foi utilizado o esquema de ligações da figura 3.1 com a retirada do wattímetro, como sugerido pela norma. O primeiro passo consiste no ajuste da tensão nominal pelo voltímetro de valor eficaz e na obtenção da leitura do amperímetro. O segundo passo consiste em ajustar a tensão nominal pelo voltímetro de valor médio ( $V_2$ ) e obter novamente a leitura do amperímetro e do voltímetro de valor eficaz ( $V_1$ ). A tabela 5.4 mostra os resultados das leituras do voltímetro de valor eficaz e voltímetro de valor médio (calibrado em valor eficaz) para os dois transformadores ensaiados. A diferença da leitura entre esses dois instrumentos é inferior a 10% para ambos os transformadores. Neste caso, a corrente de excitação é obtida pela média aritmética das leituras dos amperímetros. A tabela 5.4 inclui as diferenças entre as leituras dos voltímetros (relativas aos valores eficazes) e as correntes médias calculadas.

**Tabela 5.4 – Medidas do ensaio para obtenção da corrente de excitação.**

	Transformador 1	Transformador 2
$V_1$ [V]	128	223
$V_2$ [V]	127	220
Diferença [%]	0,78	1,35
Corrente média [A]	0,273	0,590

### 5.2.3 Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-Circuito Conforme a NBR 5380

O ensaio de perdas em carga é realizado conforme o esquema de ligações da figura 3.2. De acordo com a norma, foram alimentados o enrolamento de alta tensão (220V) do transformador 1 e o enrolamento primário (220V) do transformador 2. Como fonte de alimentação foi utilizado o mesmo equipamento do ensaio de perdas em vazio. A tensão foi aumentada gradualmente desde zero até um valor para o qual circule corrente nominal no enrolamento alimentado. Este valor, denominado tensão de curto-circuito ( $E_z$ ), está apresentado na tabela 5.5 para os transformadores 1 e 2, junto com suas respectivas correntes nominais ( $I_n$ ). A tabela 5.5 inclui também as potências absorvidas pelos transformadores, já corrigidas devido à carga dos instrumentos de medição.

**Tabela 5.5 - Medidas do ensaio de perdas em carga.**

	Transformador 1	Transformador 2
$E_z$ [V]	8,0	9,4
$I_n$ [A]	1,52	6,8
$W_E$ [W]	12	60

Os resultados obtidos no ensaio de perdas em carga permitem determinar as perdas nos enrolamentos e as perdas adicionais, bem como a impedância de curto-circuito e suas componentes resistiva e reativa. Semelhante ao ensaio de perdas em vazio, neste ensaio as leituras de tensão e potência foram realizadas no início da escala dos instrumentos, o que pode ocasionar imprecisões de leitura. Isso pode resultar num cálculo também impreciso da impedância de curto-circuito bem como das perdas nos enrolamentos e perdas adicionais.

Tanto no ensaio de perdas em vazio quanto no ensaio de perdas em carga, a temperatura ambiente era de aproximadamente 26°C. Esta temperatura foi considerada como a temperatura dos enrolamentos, já que os transformadores ficaram desenergizados nesta temperatura nas 12 horas anteriores ao ensaio. Os ensaios foram realizados em intervalos de tempo suficientemente pequenos para que a elevação da temperatura não provocasse erros significativos nas medidas.

De acordo com a norma, as perdas em carga compõem-se das perdas ôhmicas  $W_R$  e das perdas adicionais  $W_A$ . As perdas ôhmicas são determinadas pela equação 3.5 utilizando os valores das correntes obtidas no ensaio de perdas em carga e as resistências dos enrolamentos obtidas no ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos (corrigidas para a temperatura do ensaio de perdas em carga). As perdas adicionais são determinadas pela equação 3.8. A tabela 5.6 apresenta os valores calculados.

**Tabela 5.6 – Perdas ôhmicas ( $W_R$ ) e adicionais ( $W_A$ ) do ensaio de perdas em carga.**

	Transformador 1	Transformador 2
$W_R$ [W]	10,52	58,95
$W_A$ [W]	1,48	1,05

Conforme os valores obtidos na tabela 5.6, as perdas adicionais representam uma parcela pequena das perdas em carga.

A impedância de curto-circuito  $Z$  é calculada pela equação 3.12 e suas componentes resistiva  $R$  e reativa  $X$  são obtidas pelas equações 3.13 e 3.14, respectivamente. A impedância de curto-circuito  $Z\%$ , expressa em porcentagem, e suas componentes resistiva  $R\%$  e reativa  $X\%$ , são determinadas pelas equações 3.15, 3.16 e 3.17, respectivamente. Os valores calculados estão apresentados na tabela 5.7.

**Tabela 5.7 – Impedâncias de curto-circuito  $Z$  e  $Z\%$  e suas componentes resistivas e reativas.**

	Transformador 1	Transformador 2
$Z$ [ $\Omega$ ]	5,2632	1,3824
$R$ [ $\Omega$ ]	5,1939	1,2976
$X$ [ $\Omega$ ]	0,8510	0,4766
$Z\%$ [%]	3,6364	4,2727
$R\%$ [%]	3,6000	4,0000
$X\%$ [%]	0,5130	1,5021

#### 5.2.4 Cálculo do Rendimento e da Regulação

A regulação dos transformadores é obtida com as equações 3.22 e 3.23 e os resultados das componentes resistivas e reativas das impedâncias de curto-circuito obtidas no ensaio de perdas em carga. O rendimento é determinado pela equação 3.24 utilizando os

valores das perdas em carga e das perdas em vazio referidas à tensão senoidal pura. Ambos os cálculos de regulação e rendimento foram baseados nas condições nominais de operação, com fator de potência unitário no enrolamento secundário, conforme especificado pela norma. A tabela 5.8 apresenta os valores calculados.

**Tabela 5.8 – Regulação e rendimento para operação nominal e fator de potência unitário.**

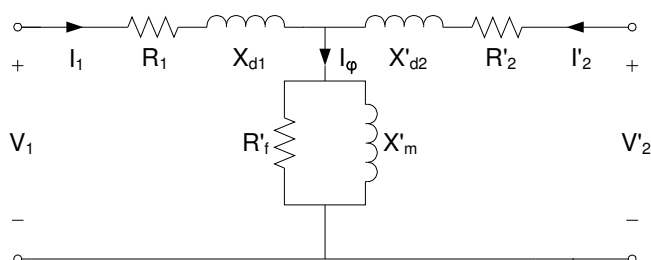
	Transformador 1	Transformador 2
$Reg$ [%]	3,6013	4,0108
$N$ [%]	93,0503	94,2261

Os valores apresentados na tabela 5.8 são referentes à temperatura de operação igual à temperatura em que foram realizados os ensaios de perdas em carga e em vazio (26°C).

Os resultados obtidos nos ensaios convencionais conforme as normas técnicas permitem obter o modelo do transformador, no qual seus parâmetros são constantes no tempo. Nas próximas seções são apresentados métodos de obtenção de tal modelo.

### 5.3 O Modelo Clássico do Transformador de Potência

O modelo clássico é aquele cujos parâmetros são obtidos a partir de ensaios clássicos em curto-circuito e circuito aberto descritos na literatura [16,26]. A figura 5.2 apresenta o modelo clássico em regime permanente.



**Figura 5.2 – Modelo clássico do transformador em regime permanente.**

No ensaio em circuito aberto são determinados os parâmetros do ramo de excitação que modelam o núcleo magnético do transformador. Admitindo que a queda de tensão nos parâmetros do enrolamento devido à corrente de excitação  $I_\phi$  pode ser desprezada, tem-se:



$$Y_{ca} = \frac{I_{\varphi}}{V_{ca}} \quad (5.1)$$

$$G_f = \frac{1}{R_f} = \frac{W_E}{V_{ca}^2} \quad (5.2)$$

$$B_f = \frac{1}{X_m} = \sqrt{Y_{ca}^2 - G_f^2} \quad (5.3)$$

onde  $Y_{ca}$  é a admitância equivalente,  $G_f$  e a condutância equivalente,  $B_f$  é a susceptância equivalente do ramo magnetizante,  $I_{\varphi}$  é a corrente de excitação,  $V_{ca}$  é a tensão nominal do enrolamento alimentado medida com o voltímetro de valor eficaz e  $W_E$  representa as perdas em vazio do transformador.

No ensaio em curto-circuito a tensão induzida no ramo de excitação é igual à queda de tensão em  $R'_2$  e  $X'_{d2}$ . Esta tensão é pequena e, por isso, o fluxo magnético no núcleo também é. Portanto as perdas no ferro podem ser desprezadas. Desta maneira, o ramo de excitação da figura 5.1 pode ser eliminado, e os elementos a serem determinados são  $R_1$ ,  $X_{d1}$ ,  $R'_2$  e  $X'_{d2}$ . A impedância de curto-circuito  $Z$ , referida ao enrolamento sob tensão, bem como suas componentes resistiva  $R$  e reativa  $X$  são obtidas pelas equações 3.10, 3.11 e 3.12, respectivamente. As resistências e reatâncias de dispersão dos enrolamentos são determinadas de forma aproximada [16,26] pelas equações 5.4 e 5.5, respectivamente.

$$R_1 = R'_2 = \frac{R}{2} \quad (5.4)$$

$$X_{d1} = X'_{d2} = \frac{X}{2} \quad (5.5)$$

Os parâmetros do modelo de ambos os transformadores são calculados a partir dos dados obtidos nos ensaios conforme as normas. As tensões eficazes em vazio são as medidas no ensaio de perdas em vazio (tabela 5.2), as perdas em vazio são as referidas à tensão senoidal pura (tabela 5.3), as correntes de excitação são as calculadas no ensaio de corrente de excitação (tabela 5.4), e as tensões de curto-circuito, correntes nominais e perdas em carga são as medidas no ensaio de perdas em carga (tabela 5.5). Os parâmetros calculados utilizando estes dados estão apresentados na tabela 5.9. Os valores estão referidos ao lado de alta tensão.

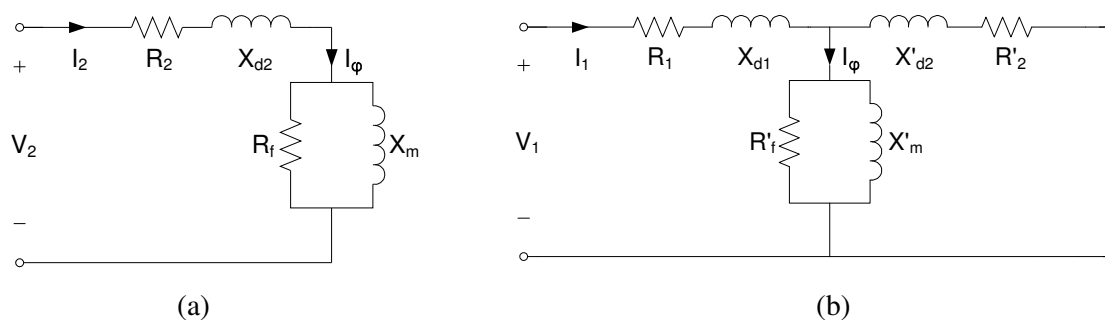
**Tabela 5.9 – Parâmetros dos modelos dos transformadores obtidos pelo método convencional.**

	Transformador 1	Transformador 2
$R'_f$ [ $\Omega$ ]	3811,8472	1572,2254
$X'_m$ [ $\Omega$ ]	1513,8690	391,2394
$R_l (=R'_2)$ [ $\Omega$ ]	2,5970	0,6488
$X_{d1} (=X'_{d2})$ [ $\Omega$ ]	0,4260	0,2383

Este é o método clássico de determinação dos parâmetros, no qual é desprezado o ramo de excitação no ensaio de curto-circuito, e desprezada a resistência e reatância de dispersão do enrolamento primário no ensaio de circuito aberto. Uma questão pode ser levantada: estas simplificações podem causar erros significativos no cálculo dos parâmetros? Na próxima seção, isso é investigado.

#### 5.4 O Modelo Convencional Modificado

Para contornar as simplificações adotadas no método clássico (convencional), pode-se, a partir dos dados experimentais, obter a impedância equivalente vista pelos terminais de baixa tensão no ensaio de circuito aberto e a impedância equivalente vista pelos terminais de alta tensão no ensaio de curto-circuito. Além disso, empregando um mecanismo de busca adequado, podem-se estimar os parâmetros de um modelo convencional modificado, no qual não é desprezado o ramo de excitação no ensaio de curto circuito e a não são desprezadas a resistência nem a reatância de dispersão do enrolamento de baixa tensão no ensaio de circuito aberto. A figura 5.3a apresenta este modelo do transformador em circuito aberto e a figura 5.3b apresenta o modelo em curto-circuito.

**Figura 5.3 – (a) Modelo equivalente em circuito aberto; (b) Modelo equivalente em curto-circuito.**

O Algoritmo Genético foi empregado na busca da solução para o problema proposto. Esta solução consiste em estimar um vetor de parâmetros

$$P = [R'_f \quad X'_m \quad R_1 \quad X_{d1}] \quad (5.6)$$

que minimize a função objetivo dada pela equação 5.7,

$$E = \frac{(\text{Re}(Z_{CA}) - \text{Re}(Z_{CA\_AG}))^2}{\text{Re}(Z_{CA})} + \frac{(\text{Im}(Z_{CA}) - \text{Im}(Z_{CA\_AG}))^2}{\text{Im}(Z_{CA})} + \frac{(\text{Re}(Z_{CC}) - \text{Re}(Z_{CC\_AG}))^2}{\text{Re}(Z_{CC})} + \frac{(\text{Im}(Z_{CC}) - \text{Im}(Z_{CC\_AG}))^2}{\text{Im}(Z_{CC})} \quad (5.7)$$

onde  $Z_{CC}$  e  $Z_{CA}$  são as impedâncias equivalentes obtidas nos ensaios em curto-circuito e em circuito aberto, respectivamente, e  $Z_{CA\_AG}$  e  $Z_{CC\_AG}$  são as impedâncias equivalentes em curto-circuito e circuito aberto estimadas pelo AG. Tais impedâncias são calculadas a partir da análise dos circuitos da figura 5.3, conforme as equações 5.8 e 5.9:

$$Z_{CA\_AG} = R_2 + jX_{d2} + \frac{R_f jX_m}{R_f + jX_m} \quad (5.8)$$

$$Z_{CC\_AG} = R_1 + jX_{d1} + \frac{\left(\frac{R'_f jX'_m}{R'_f + jX'_m}\right)(R'_2 + jX'_{d2})}{\left(\frac{R'_f jX'_m}{R'_f + jX'_m}\right) + (R'_2 + jX'_{d2})} \quad (5.9)$$

Os dados de entrada para o AG são os seguintes:

- Número de indivíduos: 200;
- Probabilidade de cruzamento: 90%;
- Probabilidade de mutação: 5%;
- Método de seleção: torneio;
- Tipo de AG: SGA (*Simple Genetic Algorithm*);
- Critério de parada: número máximo de gerações igual a 20;
- Técnicas para aceleração da convergência: variação dinâmica das probabilidades, elitismo global.

Os valores dos parâmetros calculados utilizando o método convencional estão apresentados na tabela 5.10, juntamente com as soluções estimadas pelo AG para os transformadores 1 e 2. A tabela inclui as diferenças entre os valores dos parâmetros dos

modelos, em porcentagens relativas aos valores dos parâmetros do modelo convencional. Uma comparação entre os valores calculados através do método convencional e do método convencional modificado permite afirmar que, ao se considerar o ramo de excitação no modelo em curto-circuito bem como a resistência e reatância de dispersão do enrolamento no modelo em circuito aberto, os valores estimados são bastante próximos, com uma diferença máxima de 0,56%.

**Tabela 5.10 – Parâmetros do modelo convencional e modelo convencional modificado.**

	Transformador 1			Transformador 2		
	Método convencional [Ω]	Método convencional modificado [Ω]	Diferença [%]	Método convencional [Ω]	Método convencional modificado [Ω]	Diferença [%]
$R'_f$	3811,8472	3823,6626	0,3100	1572,2254	1580,2117	0,5080
$X'_m$	1513,8690	1511,4527	0,1596	391,2394	390,6940	0,1394
$R_l (=R'_2)$	2,5970	2,5985	0,0578	0,6488	0,6493	0,0771
$X_{d1} (=X'_{d2})$	0,4260	0,4236	0,5634	0,2383	0,2380	0,1259

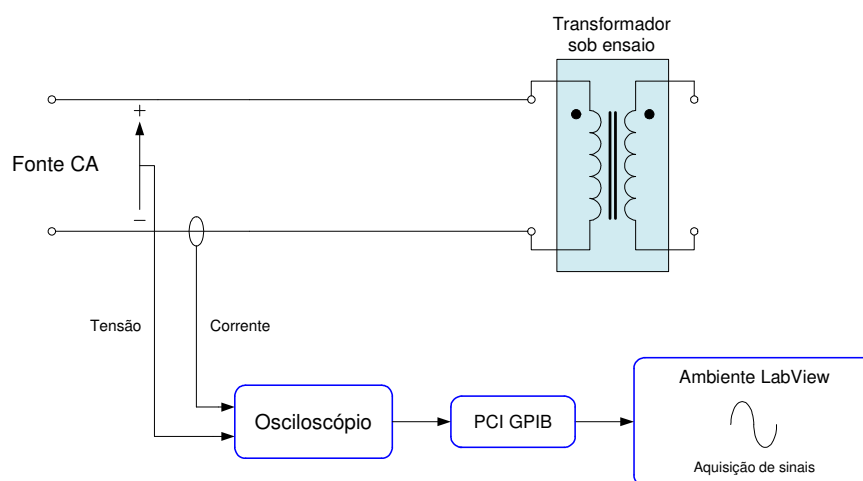
O modelo convencional modificado é, em princípio, o mais correto, pois este considera o efeito das perdas e da magnetização do núcleo no modelo em curto-circuito. Também considera o efeito da queda de tensão devido à resistência e reatância de dispersão do enrolamento no modelo em circuito aberto. Contudo, este modelo modificado pressupõe que a resistência de perdas  $R_f$  e a reatância de magnetização do núcleo  $X_m$  são constantes tanto para o ensaio em curto-circuito (realizado em baixa tensão) quanto para o ensaio em circuito aberto (realizado em tensão nominal). Se suposto um regime permanente senoidal, as perdas e a saturação do material magnético são dependentes da amplitude da indução magnética e, conseqüentemente, dependentes da amplitude da tensão nos terminais do enrolamento. Portanto não é correto afirmar que os valores de  $R_f$  e  $X_m$  são constantes tanto para o modelo em circuito aberto quanto para o modelo em curto-circuito.

## 5.5 Ensaio Empregando Instrumentação Não-Convencional para Modelagem do Núcleo do Transformador

Nesta seção é apresentado um procedimento para obtenção do modelo do núcleo do transformador com base em resultados de ensaios empregando instrumentação não-

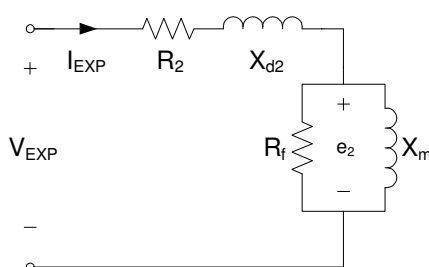
convencional. O objetivo é estimar parâmetros constantes no tempo para um modelo do núcleo que considere as peculiaridades da forma de onda da corrente de excitação.

A bancada de ensaios utilizada para aquisição das formas de onda consiste em uma fonte de tensão com intensidade variável (a mesma utilizada nos ensaios conforme as normas técnicas), um osciloscópio Tektronix TDS 420A, uma placa de aquisição de sinais PCI GPIB da *National Instruments* e o *software* LabView [27]. As formas de onda de tensão e corrente adquiridas pelo sensor de tensão e sonda de efeito *hall* são enviadas do osciloscópio à placa de aquisição e armazenadas no computador. A figura 5.4 ilustra um diagrama simplificado da bancada de ensaios.



**Figura 5.4 – Bancada de ensaios.**

O modelo do núcleo com parâmetros constantes é o mostrado na figura 5.5, no qual são consideradas a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento alimentado (neste caso, o de baixa tensão). Os parâmetros dos enrolamentos são aqueles calculados pelo método convencional.



**Figura 5.5 – Modelo do núcleo com parâmetros constantes.**

Uma vez que a resistência de perdas  $R_f$  modela as perdas magnéticas, e seu valor é tal que sua energia dissipada em um período se iguala à energia dissipada no núcleo neste mesmo intervalo, o procedimento consiste em calcular  $R_f$  a partir dos dados digitais adquiridos com a bancada de ensaios, e estimar o valor de  $X_m$  através da minimização da diferença entre a curva de corrente experimental obtida no ensaio e a curva simulada pelo modelo. O AG será empregado nesta minimização.

A força eletromotriz induzida  $e_2(t)$  e sua aproximação  $e_2(n)$  são dadas pelas equações 5.10 e 5.11, respectivamente. A potência instantânea  $p(t)$  dissipada no ramo magnetizante é dada pela equação 5.12 e a potência ativa  $P_{Rf}$  dissipada em  $R_f$  é dada pela equação 5.13. A resistência de perdas  $R_f$  é calculada pela equação 5.15, onde  $e_{2ef}$  é a força eletromotriz eficaz dada pela equação 5.14.

$$e_2(t) = V_{EXP}(t) - R_2 I_{EXP}(t) - L_{d2} \frac{dI_{EXP}(t)}{dt} \quad (5.10)$$

$$e_2(n) \approx V_{EXP}(n) - R_2 I_{EXP}(n) - L_{d2} \frac{I_{EXP}(n) - I_{EXP}(n-1)}{\Delta t} \quad (5.11)$$

$$p(t) = e_2(t) I_{EXP}(t) \quad (5.12)$$

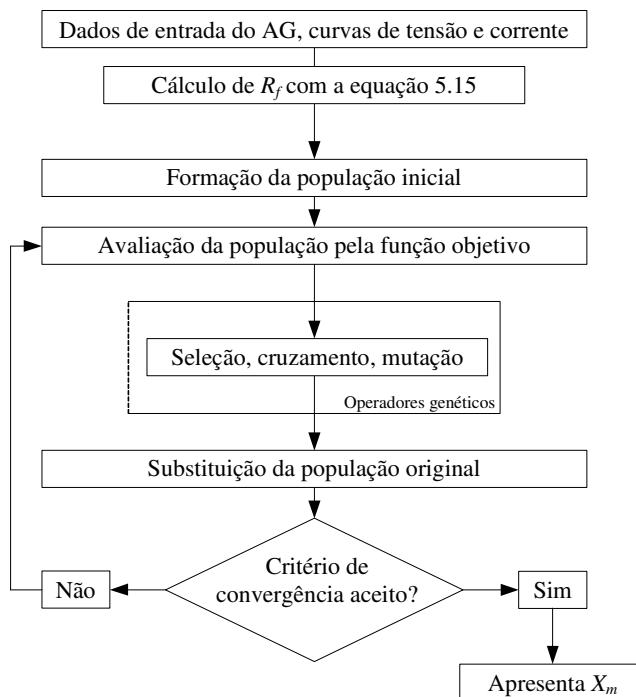
$$P_{Rf} = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt \approx \frac{1}{T} \sum_{n=2}^N \left( \frac{p(n) + p(n-1)}{2} \right) \Delta t \quad (5.13)$$

$$e_{2ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T e_2^2(t) dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=2}^N \left( \frac{e_2^2(n) + e_2^2(n-1)}{2} \right) \Delta t} \quad (5.14)$$

$$R_f \approx \frac{e_{2ef}^2}{P_{Rf}} \quad (5.15)$$

Nas equações 5.10 a 5.14,  $V_{EXP}(t)$  é a tensão e  $I_{EXP}(t)$  é a corrente, ambas adquiridas com a bancada,  $L_{d2}$  é a indutância de dispersão ( $L_{d2} = X_{d2}/\omega$  onde  $\omega$  é a frequência angular),  $T$  é o período e  $N$  é o número de pontos das formas de onda da tensão e corrente, e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre dois pontos das curvas.

A figura 5.6 apresenta um fluxograma do procedimento para obtenção do modelo do núcleo com parâmetros constantes. O AG é executado após o cálculo de  $R_f$ .



**Figura 5.6 – Fluxograma do procedimento para obtenção do modelo do núcleo.**

O AG é aplicado na minimização da função objetivo dada pela equação 5.16,

$$E = \sum_{n=1}^N \left( \frac{(I_{EXP}(n) - I_{AG}(n))^2}{|I_{EXP}(n)|} \right) \quad (5.16)$$

onde  $I_{AG}(n)$  é a corrente estimada pelo AG. As correntes na resistência de perdas  $R_f$  e na indutância de magnetização  $L_m$  ( $L_m = X_m/\omega$ ) são determinadas pelas equações 5.17 e 5.18, respectivamente. A corrente estimada pelo AG é determinada pela equação 5.19.

$$I_{R_f}(n) = \frac{e_2(n)}{R_f} \quad (5.17)$$

$$I_{L_m}(n) \approx \frac{\Delta t}{L_m} e_2(n) + I_{L_m}(n-1) \quad (5.18)$$

$$I_{AG}(n) \approx I_{R_f}(n) + I_{L_m}(n) \quad (5.19)$$

Os dados de entrada para o AG são os seguintes:

- Número de indivíduos: 100;
- Probabilidade de cruzamento: 90%;
- Probabilidade de mutação: 5%;
- Método de seleção: torneio;
- Tipo de AG: SGA;
- Critério de parada: número máximo de gerações igual a 20;
- Técnicas para aceleração da convergência: variação dinâmica das probabilidades, elitismo global.

No ensaio a tensão foi aumentada gradualmente desde zero até o valor nominal do enrolamento alimentado tomando como referência a leitura do valor eficaz de tensão fornecida pelo osciloscópio. O outro enrolamento ficou em aberto.

Os parâmetros  $R_f$  e  $X_m$  calculados pelo método convencional e  $X_m$  estimado pelo AG para ambos os transformadores encontram-se na tabela 5.11, que também apresenta os valores de  $R_f$  calculados com a equação 5.15 e as diferenças, em porcentagem, relativas ao método convencional.

**Tabela 5.11 – Parâmetros obtidos pelo método convencional e estimados pelo AG.**

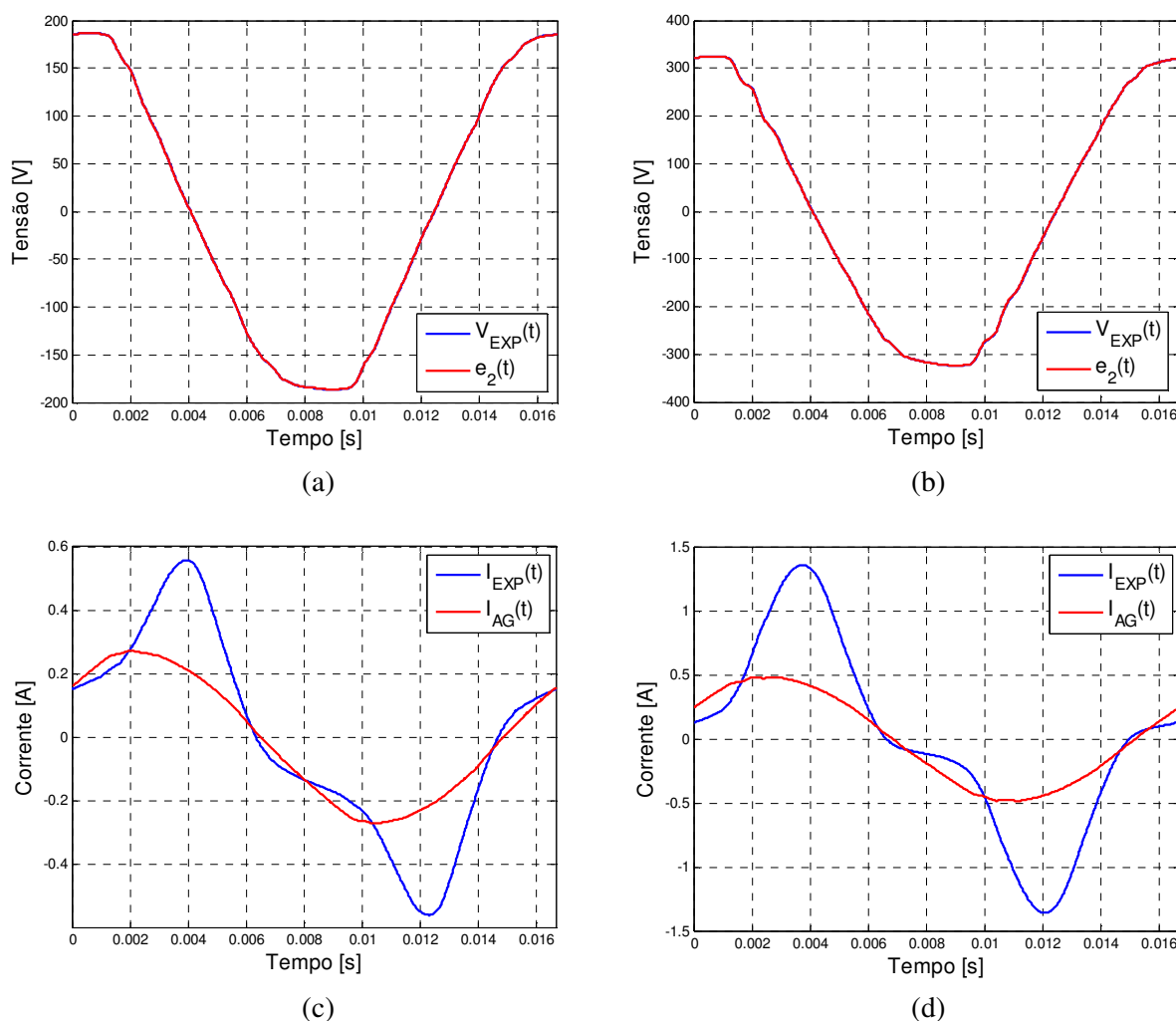
	Transformador 1			Transformador 2		
	Método convencional [Ω]	Estimado pelo AG [Ω]	Diferença [%]	Método convencional [Ω]	Estimado pelo AG [Ω]	Diferença [%]
$R'_f$	3811,8472	3538,1297	7,1807	1572,2254	1330,8453	15,3528
$X'_m$	1513,8690	2767,9300	82,8381	391,2394	814,0879	108,0792

Apesar de a resistência de perdas  $R_f$  modelar corretamente o efeito das perdas magnéticas, seu valor é diferente do calculado pelo método convencional. Isto indica que as perdas medidas com a bancada são diferentes daquelas medidas usando o método convencional. De fato, as perdas medidas com a bancada são superiores às medidas pelo método convencional, e as tensões eficazes calculadas com a equação 5.14 são superiores às leituras dos valores eficazes de tensão fornecidas pelo osciloscópio durante o ensaio. Isso leva à imprecisão no valor calculado de  $R_f$ . Fica clara a necessidade de estimação dos parâmetros de outra maneira.

As figuras 5.7a e 5.7b apresentam as formas de onda das tensões experimentais  $V_{EXP}(t)$  e forças eletromotrizes induzidas  $e_2(t)$  simuladas para o transformador 1 e 2,



respectivamente. Já as figuras 5.7c e 5.7d apresentam as formas de onda das correntes experimentais  $I_{EXP}(t)$  e simuladas  $I_{AG}(t)$  para os transformadores 1 e 2, respectivamente.



**Figura 5.7 – Tensões experimentais  $V_{EXP}(t)$ , forças eletromotrizes induzidas  $e_2(t)$ , correntes experimentais  $I_{EXP}(t)$  e correntes simuladas  $I_{AG}(t)$  para os transformadores 1 e 2.**

Nota-se que as formas de onda  $V_{EXP}(t)$  e  $e_2(t)$  são praticamente iguais, o que significa que os efeitos da resistência e reatância de dispersão dos enrolamentos podem ser, neste caso, desprezadas. Já as formas de onda das correntes experimentais e simuladas apresentam uma diferença considerável, o que explica as disparidades entre os valores das reatâncias de magnetização apresentados na tabela 5.11. Como o material ferromagnético que compõe o núcleo apresenta o efeito de saturação bem como perdas magnéticas (perdas por histerese, correntes induzidas e perdas excedentes), o transformador é um dispositivo altamente não-linear, devendo ser modelado de forma adequada. O modelo com

parâmetros constantes no tempo não representa corretamente a forma de onda peculiar da corrente de excitação.

Um fato interessante são as formas de onda da tensão de alimentação apresentadas na figura 5.7a e 5.7b. Ambas são distorcidas, o que já foi comprovado no ensaio de perdas em vazio dos transformadores conforme as normas técnicas, em que o fator de forma calculado indicava uma distorção na forma de onda da tensão de alimentação.

## 5.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos e resultados obtidos nos ensaios dos transformadores conforme as normas técnicas. Para determinar os parâmetros do modelo do transformador de potência, alguns ensaios são essenciais: ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos, ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação, e ensaio de perdas em carga e impedância de curto-circuito. Nestes ensaios, foi utilizada instrumentação convencional para medição das grandezas elétricas.

A resistência elétrica dos enrolamentos foi determinada utilizando um microohmímetro que emprega o método da Ponte de Kelvin. Os valores de resistência medidos estão associados aos dados construtivos dos transformadores (bitola e número de espiras dos enrolamentos).

As perdas em vazio foram obtidas utilizando uma alimentação com forma de onda distorcida, e então referidas à tensão senoidal pura através de uma equação que leva em conta o fator de forma da tensão de alimentação. A corrente de excitação, medida de uma forma aproximada, também leva em conta a distorção da forma de onda da tensão de alimentação.

A impedância de curto-circuito, calculada a partir dos dados dos ensaios de perdas em carga, é usada na determinação da regulação de tensão, que é calculada de forma aproximada.

Procurou-se realizar os ensaios no intervalo de tempo o mais curto possível, para que a elevação de temperatura não causasse erros significantes nas leituras das medidas. Não havia disponibilidade de termômetros ou pares termoeletricos para obtenção precisa da temperatura dos enrolamentos. Dessa forma, a temperatura dos transformadores como um todo foi considerada como sendo a temperatura ambiente, já que esses equipamentos ficaram desenergizados nesta temperatura nas 12 horas anteriores aos ensaios.

Foi verificado que um modelo com parâmetros constantes no tempo não representa corretamente a forma de onda peculiar da corrente de excitação. Como o transformador é um dispositivo altamente não-linear, este deve ser modelado de forma adequada.

No capítulo seguinte será apresentada uma metodologia para obtenção de um modelo que permite descrever corretamente a relação tensão-corrente nos terminais do transformador. Também será apresentada uma análise comparativa entre os resultados dos ensaios conforme as normas utilizando instrumentação convencional e os resultados dos ensaios utilizando instrumentação não-convencional.

## Capítulo 6

### **Modelagem das Não-Linearidades do Transformador e Análise Comparativa entre Ensaio Utilizando Instrumentação Convencional e Não-Convencional**

#### **6.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentados um modelo do transformador com parâmetros variantes no tempo e um algoritmo para a estimação destes parâmetros. Os resultados experimentais necessários são obtidos com uma bancada de caracterização de materiais magnéticos que utiliza instrumentação não-convencional. Em seguida, será apresentada uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios com a bancada e em ensaios conforme as normas técnicas.

Para a determinação dos parâmetros em regime permanente é necessária uma análise qualitativa das tensões e correntes, do fluxo concatenado e disperso, e do comportamento do material ferromagnético. A partir disto, pode-se fazer suposições baseadas em resultados experimentais. Uma delas é a de que os parâmetros que modelam os enrolamentos podem ser considerados constantes para determinada frequência e temperatura, independente da intensidade de corrente e valor da tensão de operação do transformador. Já que as linhas de fluxo disperso têm um caminho que consiste principalmente de ar e cobre dos enrolamentos, as reatâncias de dispersão associadas a estes fluxos podem ser consideradas constantes, como já discutido no capítulo 2.

Outra suposição é a de que a não-linearidade é representada por parâmetros variantes no tempo para modelar o núcleo do transformador. Tal conjectura é razoável, já que o ramo de excitação modela a relação entre a corrente de excitação e o enlace de fluxo mútuo, a qual é não-linear. Diversos trabalhos se baseiam nestes mesmos princípios [3-5,11].

## 6.2 Modelagem das Não-Linearidades do Transformador de Potência

### 6.2.1 Parâmetros do Modelo dos Enrolamentos

O ensaio de perdas em carga prescrito pelas normas permite obter a impedância de curto-circuito. Nos ensaios empregando instrumentação convencional, as leituras das grandezas elétricas (tensão e potência) foram realizadas no início da escala dos instrumentos. Com isso, a imprecisão nas medidas pode resultar num cálculo também impreciso da impedância de curto-circuito, bem como das perdas nos enrolamentos e perdas adicionais, como já discutido na seção 5.2.3.

O procedimento proposto para estimação da impedância de curto-circuito consiste em adquirir as formas de onda de tensão e corrente nos terminais de um dos enrolamentos do transformador sob ensaio, com os terminais do outro enrolamento em curto-circuito. A aquisição é realizada com a bancada de ensaios descrita na seção 5.5.

O AG é empregado na estimação das componentes resistiva  $R$  e reativa  $X$  da impedância de curto-circuito através da minimização da função objetivo dada pela equação 6.1,

$$E = \sum_{n=1}^N \left( \frac{(I_{EXP}(n) - I_{AG}(n))^2}{|I_{EXP}(n)|} \right) \quad (6.1)$$

onde  $I_{EXP}(n)$  é a corrente experimental,  $I_{AG}(n)$  é a corrente simulada e  $N$  é o número de pontos das curvas. O modelo do transformador em curto-circuito com os parâmetros  $R$  e  $X$  estimados pelo AG é baseado na equação 6.2. A corrente simulada utilizando os parâmetros estimados é dada pela equação 6.4, obtida a partir da equação 6.3.

$$V_{EXP}(t) = RI_{AG}(t) + L \frac{dI_{AG}(t)}{dt} \quad (6.2)$$

$$V_{EXP}(n) \approx RI_{AG}(n) + L \frac{I_{AG}(n) - I_{AG}(n-1)}{\Delta t} \quad (6.3)$$

$$I_{AG}(n) \approx \frac{\Delta t}{R\Delta t + L} V_{EXP}(n) + \frac{L}{R\Delta t + L} I_{AG}(n-1) \quad (6.4)$$

Nas equações 6.2 a 6.4,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre dois pontos de  $I_{AG}(t)$  e  $L$  é a indutância de curto-circuito, definida como  $L = X/\omega$ .

Estimada a impedância de curto-circuito, sua componente resistiva representa as perdas dissipadas nos enrolamentos e no núcleo e sua componente reativa representa a energia armazenada no circuito magnético.

No ensaio em curto-circuito, o método convencional despreza as perdas no núcleo e assume que  $R$  e  $L$  são divididas igualmente entre os dois enrolamentos [16,26]. Contudo, suas resistências geralmente são diferentes, conforme foi verificado experimentalmente no ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos.

Neste trabalho, o procedimento proposto para a determinação dos parâmetros dos enrolamentos consiste em calculá-los de forma proporcional aos valores de resistência obtidos no ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos. Com isso, os valores calculados são relacionados aos dados construtivos do transformador.

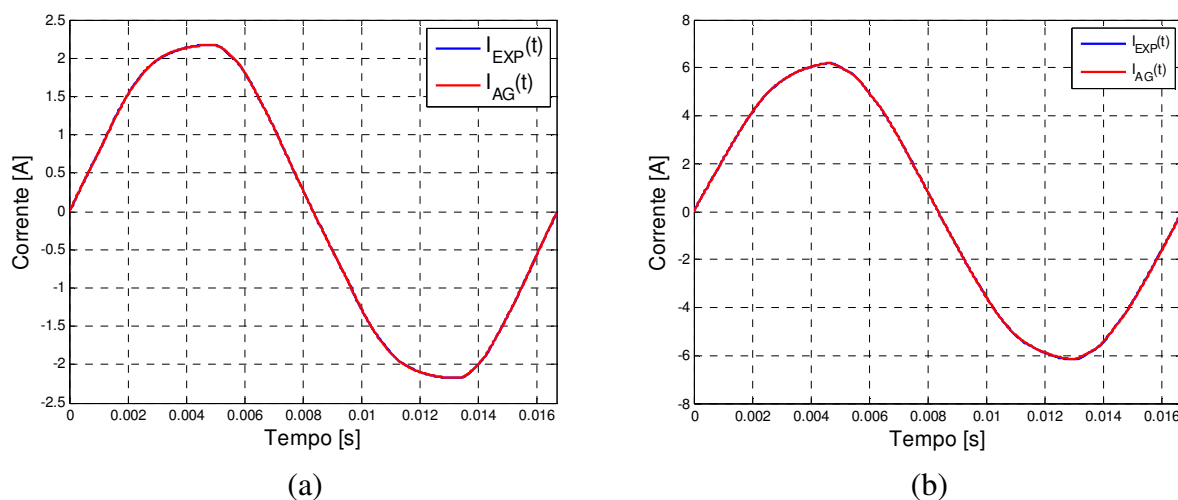
As perdas no núcleo, que são desconsideradas no procedimento, têm pouca influência no resultado final. Isto porque tanto a força eletromotriz induzida no ramo de excitação quanto a corrente que nele circula são baixas e, conseqüentemente, as perdas no núcleo podem ser desprezadas.

### **6.2.2 Resultados dos Ensaio para Estimação dos Parâmetros dos Enrolamentos**

Os ensaios em curto-circuito dos transformadores 1 e 2 foram realizados com a bancada de ensaios descrita na seção 5.5. A tabela 6.1 apresenta os parâmetros dos enrolamentos calculados pelo método convencional e os estimados pelo AG. A tabela também apresenta as diferenças, em porcentagem, relativas ao método convencional. As figuras 6.1a e 6.1b apresentam as curvas de corrente experimental  $I_{EXP}(t)$  adquiridas com a bancada e as curvas de corrente  $I_{AG}(t)$  simuladas utilizando os parâmetros estimados pelo AG para os transformadores 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 6.1 – Parâmetros dos enrolamentos estimados pelo método convencional e não-convencional.**

	Transformador 1			Transformador 2		
	Método convencional [Ω]	Método não-convencional [Ω]	Diferença [%]	Método convencional [Ω]	Método não-convencional [Ω]	Diferença [%]
$R_1$	2,5970	2,7122	4,4359	0,6488	0,6551	0,9710
$R'_2$	2,5970	2,0758	20,0693	0,6488	0,6043	6,8588
$X_{d1}$	0,4260	0,6295	47,7700	0,2383	0,2837	19,0516
$X'_{d2}$	0,4260	0,4818	13,0986	0,2383	0,2617	9,8196

**Figura 6.1 – Correntes experimentais  $I_{EXP}(t)$  e simuladas  $I_{AG}(t)$  para os transformadores 1 e 2.**

Os parâmetros estimados apresentam uma diferença considerável se comparados aos obtidos pelo método convencional. Esta diferença pode ser resultado de imprecisões na leitura dos instrumentos no ensaio de perdas em carga, realizado conforme as normas. Como discutido no capítulo anterior, as leituras de tensão e potência foram realizadas no início da escala dos instrumentos, o que pode ocasionar imprecisões de leitura.

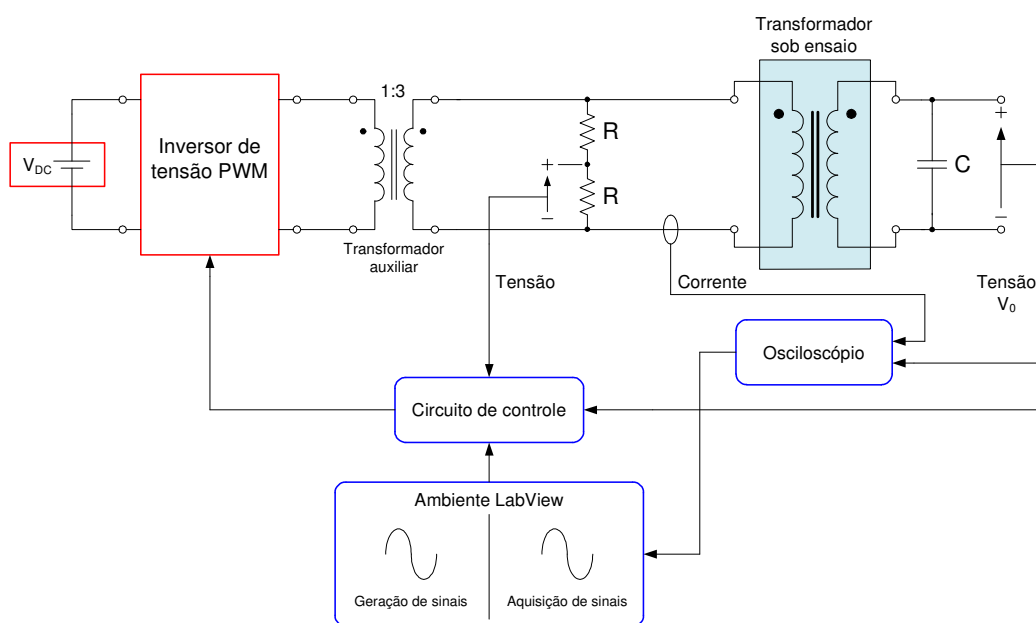
A distorção da forma de onda da tensão de alimentação provoca uma distorção na forma de onda da corrente experimental. Ainda assim, observa-se uma concordância entre as curvas das correntes experimentais e simuladas, o que indica que o transformador em curto-circuito pode ser representado por um modelo com parâmetros constantes.

### 6.2.3 Bancada de Ensaio para Aquisição das Curvas de Tensão e Corrente

Uma vez que as perdas em vazio do transformador nos ensaios normalizados devem ser referidas à tensão senoidal, a medida das perdas e o algoritmo proposto para

estimação dos parâmetros do modelo do núcleo devem ser baseados neste regime de operação. A bancada de ensaios apresentada no capítulo 5 não tem esta característica, já que as formas de onda da tensão de alimentação são distorcidas. Para contornar este problema, os transformadores foram ensaiados em uma bancada de ensaios para caracterização de materiais magnéticos [7]. Esta bancada tem como principal característica a imposição da forma de onda senoidal da tensão no enrolamento secundário, deixando livre a evolução no tempo da corrente de excitação no enrolamento primário. Isto é realizado por um sistema de controle em malha fechada.

A figura 6.2 apresenta um esquema da bancada de ensaios. Um inversor de tensão monofásico em ponte completa é utilizado como fonte de alimentação. Para a adequação da tensão (nominal) no enrolamento primário do transformador sob ensaio (TSE) à tensão na saída do inversor, é utilizado um transformador auxiliar com relação de transformação de 1 para 3. A corrente no enrolamento primário, adquirida com uma sonda de efeito *hall*, e a tensão  $V_0$  no enrolamento secundário do TSE são enviadas do osciloscópio (Tektronix 2430A) a uma placa de aquisição de sinais PCI GPIB residente em um computador hospedeiro do *software* LabView [27]. O circuito de controle do inversor adquire uma amostra da tensão no enrolamento primário do TSE para atuar na compensação do nível contínuo desta tensão. O divisor de tensão ( $R = 10k\Omega$ ) realiza a adequação do valor da tensão. O circuito de controle também utiliza a tensão  $V_0$  no enrolamento secundário do TSE (filtrada por um capacitor de  $4700pF$ ) e um sinal de referência gerado pelo LabView. Detalhes sobre esta bancada podem ser encontrados na referência [7].

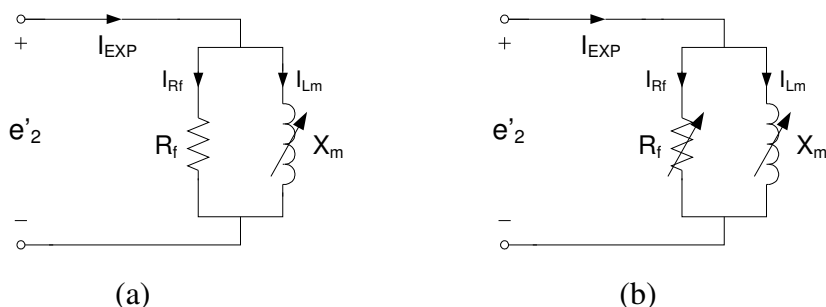


**Figura 6.2 – Esquema da bancada de ensaios com imposição de  $V_0$ .**



### 6.2.4 Algoritmo Proposto Para Obtenção dos Parâmetros do Núcleo

Com as formas de onda de tensão e corrente adquiridas com a bancada de ensaios é possível obter o modelo do núcleo. A figura 6.3 apresenta os modelos do núcleo do transformador, nos quais seus parâmetros (variantes no tempo) estão referidos ao enrolamento de baixa tensão. Nestes modelos a resistência de perdas  $R_f$  representa as perdas magnéticas. Seu valor é tal que sua energia dissipada em um período se iguala à energia dissipada no núcleo neste mesmo intervalo, como já discutido no capítulo 2. Já a reatância de magnetização representa o comportamento da saturação do núcleo. Tanto o modelo apresentado na figura 6.3a quanto o modelo apresentado na figura 6.3b terão seus parâmetros obtidos a partir dos dados experimentais.



**Figura 6.3 – Modelos do núcleo: (a)  $R_f$  constante e  $X_m$  variável; (b)  $R_f$  e  $X_m$  variáveis.**

Como o enrolamento secundário do TSE está em aberto, a tensão  $V_2(t)$  adquirida nos terminais deste enrolamento é a própria força eletromotriz induzida  $e_2(t)$ . O segundo termo da soma no lado direito da equação de tensão 6.5 é nulo, já que a indutância de magnetização  $L_m$  ( $L_m = X_m/\omega$ ) é constante durante pequenos intervalos de tempo (o que será descrito a seguir). Com isso, as correntes em  $L_m$  e  $R_f$  são determinadas pelas equações 6.6 e 6.7, respectivamente. A corrente estimada pelo AG é dada pela equação 6.8.

$$e'_2(t) = \frac{d}{dt}(L_m(t)I_{L_m}(t)) = L_m \frac{dI_{L_m}(t)}{dt} + I_{L_m} \frac{dL_m(t)}{dt} \quad (6.5)$$

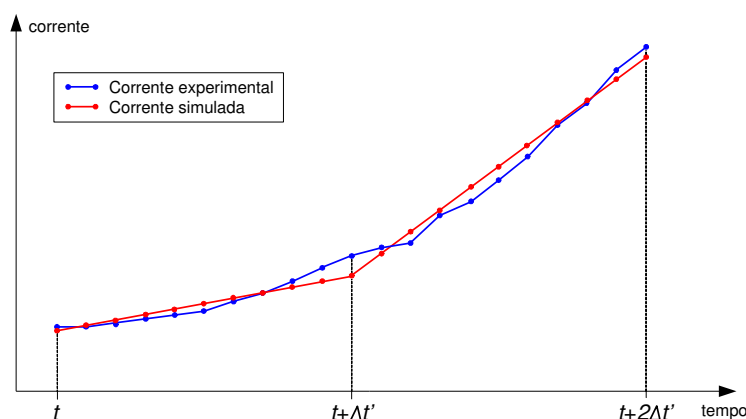
$$I_{L_m}(t) = \frac{1}{L_m} \int e'_2(t) dt \approx \frac{\Delta t}{L_m} e'_2(t) + I_{L_m}(t - \Delta t) \quad (6.6)$$

$$I_{R_f}(t) = \frac{e'_2(t)}{R_f} \quad (6.7)$$

$$I_{AG}(t) \approx I_{Rf}(t) + I_{Lm}(t) \quad (6.8)$$

onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre dois pontos de  $I_{AG}(t)$ .

O algoritmo proposto consiste em determinar os parâmetros  $R_f$  e  $X_m$  variantes no tempo empregando o Algoritmo Genético como método de estimação destes parâmetros. O procedimento consiste em considerar os parâmetros constantes durante pequenos intervalos de tempo ( $\Delta t'$ ). Os parâmetros são então estimados pela minimização da diferença entre a curva da corrente experimental e a curva de corrente simulada. Um intervalo de tempo  $\Delta t'$  corresponde a uma iteração  $n$  do algoritmo. Para facilitar a compreensão, a figura 6.4 ilustra um exemplo de como o AG estima os parâmetros através da minimização da diferença entre as curvas da corrente experimental  $I_{EXP}(t)$  (em azul) e simulada  $I_{AG}(t)$  (em vermelho). Na figura 6.4,  $t$  é um instante de tempo qualquer.



**Figura 6.4 – Exemplo de corrente experimental e simulada para dois intervalos de tempo  $\Delta t'$ .**

O AG é executado em cada iteração  $n$  do algoritmo proposto. Logo, os parâmetros  $R_f$  e  $X_m$  são estimados em cada intervalo de tempo  $\Delta t'$  através da minimização da função objetivo dada pela equação 6.9,

$$E = \sum_{i=(n-1)\cdot passo+1}^{n\cdot passo} \frac{(I_{EXP}(i) - I_{AG}(i))^2}{|I_{EXP}(i)|} + \sum_{i=N-n\cdot passo+1}^{N-(n-1)\cdot passo} \frac{(I_{EXP}(i) - I_{AG}(i))^2}{|I_{EXP}(i)|} \quad (6.9)$$

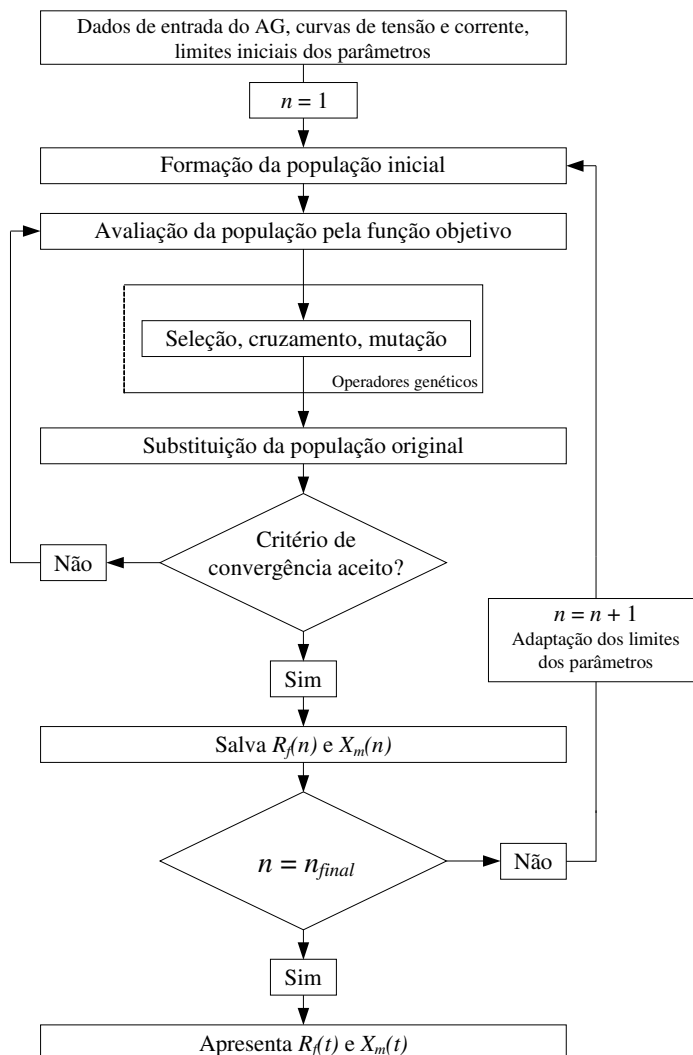
onde  $n$  é o número da iteração do algoritmo proposto,  $passo$  é o número de pontos da curva da corrente experimental correspondente a um intervalo de tempo  $\Delta t'$  e  $N$  é o número de

pontos correspondentes a meio período da curva da corrente experimental. Por exemplo, na figura 6.4 o *passo* vale 10, o que é equivalente a  $\Delta t' = 10\Delta t$ .

O primeiro termo da soma no lado direito da equação 6.9 corresponde à soma do quadrado dos resíduos de corrente em intervalos de tempo nos quais a indução magnética no núcleo está crescendo (de valor nulo ao valor máximo). Já o segundo termo corresponde a intervalos de tempo onde a indução está decrescendo (de valor máximo ao valor nulo). Portanto, são necessárias para a execução do algoritmo as formas de onda de tensão e corrente no intervalo de tempo correspondente ao semi-ciclo positivo da forma de onda da indução magnética.

Tanto a corrente quanto a tensão adquiridas nos ensaios contêm ruído, o que interfere na estimação dos parâmetros, já que, conforme o exemplo da figura 6.4, o ruído e/ou um valor de *passo* inadequado pode levar à estimação incorreta dos parâmetros. Por este motivo, dá-se início ao procedimento com a adequação das curvas de tensão e corrente. Isto é realizado por meio de uma amostragem de pontos das curvas e empregando interpolação para atenuar o ruído e adequar o número de pontos das curvas adquiridas à execução do algoritmo.

A figura 6.5 apresenta um fluxograma do algoritmo proposto para obtenção dos parâmetros do modelo com  $R_f$  e  $X_m$  variáveis (figura 6.3b). O processo se inicia com a entrada de dados para o AG, curvas experimentais da tensão e corrente já adequadas e os limites (faixas de variação) iniciais dos parâmetros  $R_f$  e  $X_m$ . O AG é então executado e, depois de satisfeito o critério de convergência, são salvos os valores estimados de  $R_f(n)$  e  $X_m(n)$  da iteração atual. Baseado nos valores dos parâmetros estimados, seus limites são adaptados. Enquanto o número de iterações não atingir  $n_{final}$ , o AG é executado novamente e novos valores de  $R_f(n)$  e  $X_m(n)$  são estimados. Quando o número da iteração  $n$  atingir  $n_{final}$ , os parâmetros estimados para cada iteração são apresentados como formas de onda  $R_f(t)$  e  $X_m(t)$ . O fluxograma para obtenção do modelo com  $R_f$  constante (figura 6.3a) é o mesmo, porém  $R_f$  é calculado pela equação 5.15 no início do processo e o AG estima apenas  $X_m(n)$  em cada iteração.



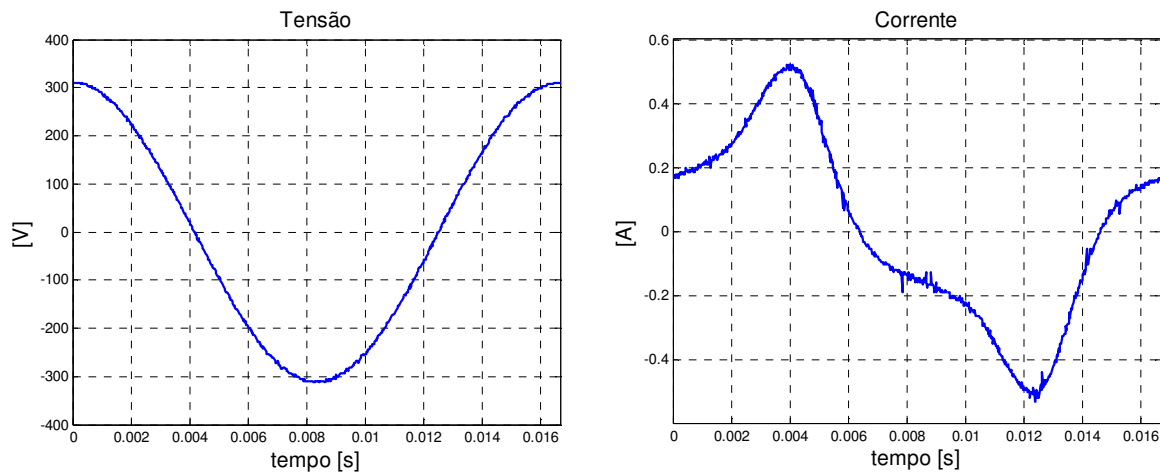
**Figura 6.5 – Fluxograma do algoritmo proposto para obtenção do modelo do núcleo.**

A adaptação dos limites dos parâmetros em determinada iteração consiste em reduzir o espaço de busca para regiões em volta dos parâmetros estimados na iteração anterior. Isto reduz consideravelmente o tempo de processamento, já que se pode reduzir o número de indivíduos da população e/ou o número de gerações do AG sem perder a garantia de convergência.

### **6.2.5 Resultados dos Ensaio com a Bancada e Aplicação do Algoritmo Proposto na Estimação dos Parâmetros do Modelo do Núcleo**

A figura 6.6 apresenta as curvas da tensão  $V_2(t)$  no enrolamento secundário (220V) e da corrente  $I_1(t)$  no enrolamento primário (127V) do transformador 1 adquiridas com a

bancada de ensaios. O transformador 2 não pôde ser ensaiado devido à limitação no valor da tensão na saída do transformador auxiliar.



**Figura 6.6 – Tensão  $V_2(t)$  e corrente  $I_1(t)$  adquiridas com a bancada.**

A tensão adquirida no enrolamento secundário  $V_2(t)$  apresenta uma forma de onda senoidal, o que implica indiretamente numa forma de onda de indução magnética no núcleo também senoidal. Com isso, as perdas medidas são as referidas à tensão senoidal.

Antes de executar o algoritmo é necessário estipular os valores para os parâmetros  $N$  e *passo*. Foi verificado que valores adequados para estes parâmetros são 5000 e 10, respectivamente. Com isso, o número de iterações do algoritmo é  $n_{final} = 250$ . Os dados de entrada para o AG são os seguintes:

- Número de indivíduos: 30 para primeira execução e 60 para segunda execução;
- Probabilidade de cruzamento: 90%;
- Probabilidade de mutação: 5%;
- Método de seleção: torneio;
- Tipo de AG: SGA;
- Critério de parada: número máximo de gerações igual a 12;
- Técnicas para aceleração da convergência: variação dinâmica das probabilidades, elitismo global.

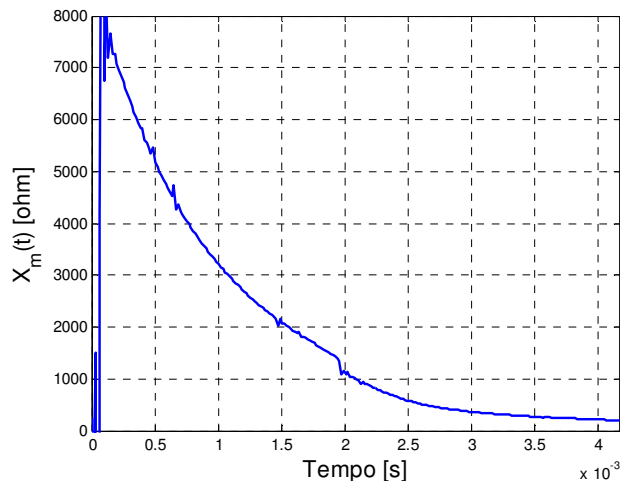
O algoritmo proposto foi executado duas vezes: a primeira para simulação com  $R_f$  constante e  $X_m$  variável no tempo, e a segunda para simulação com  $R_f$  e  $X_m$  variáveis no tempo. A tabela 6.2 apresenta as perdas em vazio referidas à tensão senoidal pura e  $R_f$  calculado pelo método convencional bem como os resultados obtidos pelo algoritmo para

as duas simulações. A tabela também apresenta as diferenças, em porcentagem, relativas ao método convencional.

**Tabela 6.2 – Perdas em vazio e resistência de perdas  $R_f$  calculadas pelo método convencional e não-convencional.**

	Método convencional	Método não-convencional			
		$R_f$ constante e $X_m$ variável	Diferença [%]	$R_f$ e $X_m$ variáveis	Diferença [%]
Perdas em vazio [W]	12,896	15,2599	18,3121	15,2568	18,2881
$R_f$ [ $\Omega$ ]	3811,8472	3169,3768	16,8546	–	–

Na primeira execução do algoritmo ( $R_f$  constante e  $X_m$  variável no tempo) a resistência de perdas  $R_f$  foi calculada inicialmente com auxílio da equação 5.15 e seu valor está apresentado na tabela 6.2. A figura 6.7 apresenta  $X_m(t)$  obtida pelo algoritmo para o primeiro quarto de período, intervalo em que a indução magnética está aumentando de valor nulo ao valor máximo.  $X_m(t)$  para o restante do ciclo é obtida por simetria.

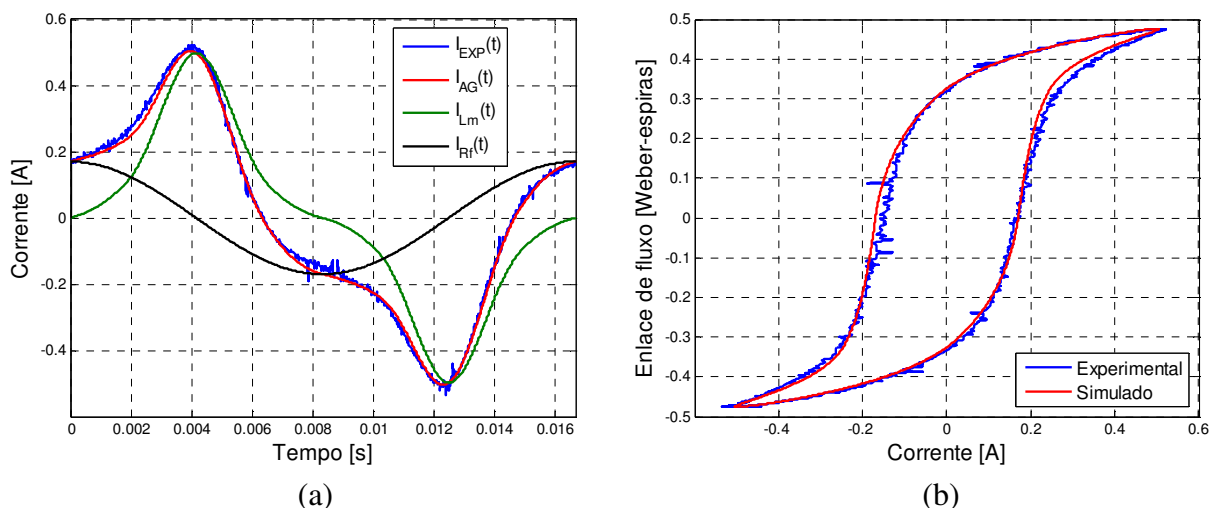


**Figura 6.7 – Reatância de magnetização  $X_m(t)$  para  $R_f$  constante (referida ao lado de alta).**

O valor da reatância de magnetização depende da indução magnética no material. Na região de saturação, seu valor é baixo. Isto está de acordo com a curva apresentada, uma vez que a região de saturação corresponde aos maiores valores de indução e, conseqüentemente, aos menores valores de reatância de magnetização.

A figura 6.8a apresenta as formas de onda da corrente experimental  $I_{EXP}(t)$  medida no enrolamento primário do TSE e da corrente simulada  $I_{AG}(t)$  bem como suas

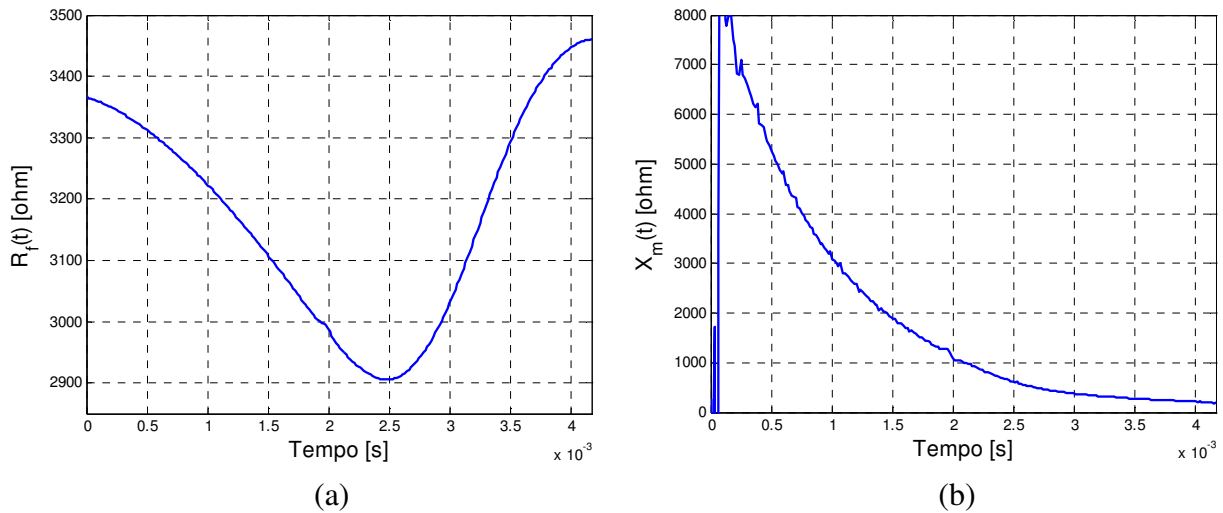
componentes  $I_{Lm}(t)$  e  $I_{Rf}(t)$ . A figura 6.8b apresenta o laço  $\lambda$ - $i$  experimental e simulado. O laço  $\lambda$ - $i$  experimental tem a mesma forma do laço  $B$ - $H$  do material empregado na construção do núcleo magnético.



**Figura 6.8 – Simulação com  $R_f$  constante e  $X_m$  variável: (a) Correntes experimental e simuladas; (b) Laço  $\lambda$ - $i$  experimental e simulado.**

Pode-se observar a boa concordância entre as formas de onda da corrente experimental e simulada. Entretanto, alguns trechos do laço  $\lambda$ - $i$  apresentam certa discordância. Pode-se observar na figura 6.8a que a corrente na resistência de perdas  $R_f$  é senoidal, já que este parâmetro é constante.

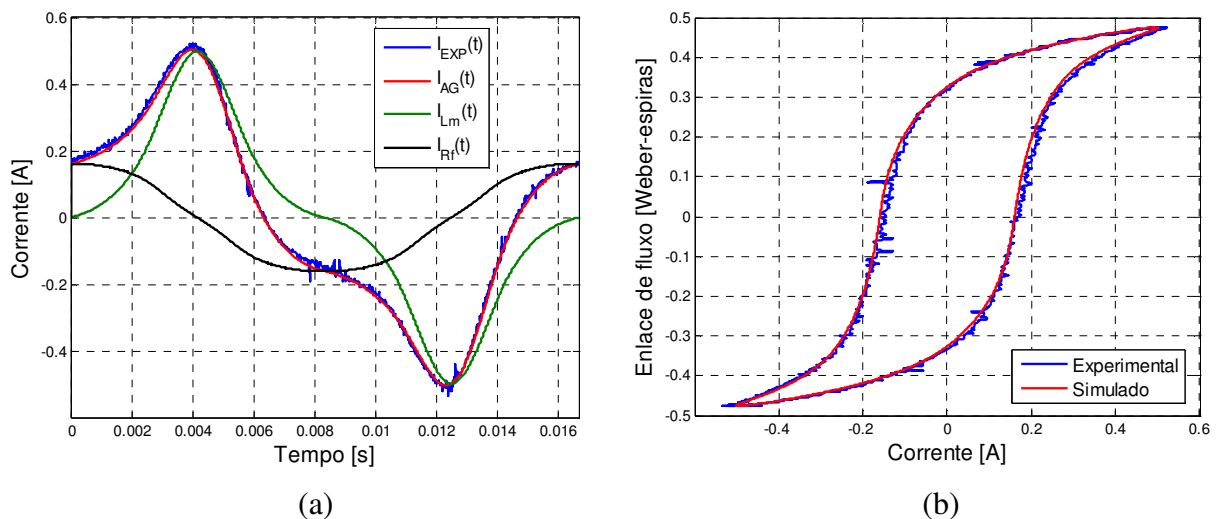
Na segunda execução do algoritmo foram estimados  $R_f(t)$  e  $X_m(t)$  variáveis no tempo. A figura 6.9 apresenta estes parâmetros em função do tempo (referidos ao lado de alta tensão). Novamente, os parâmetros para o restante do ciclo são obtidos por simetria.



**Figura 6.9 – Simulação com  $R_f$  e  $X_m$  variáveis: (a) Resistência de perdas  $R_f(t)$ ; (b) Reatância de magnetização  $X_m(t)$ .**

A resistência de perdas  $R_f(t)$ , apesar de variar no tempo para modelar corretamente a corrente de excitação, dissipa a mesma energia por ciclo que a calculada na primeira execução. Novamente, a reatância de magnetização representa o comportamento não-linear do material.

A figura 6.10a apresenta a forma de onda da corrente experimental  $I_{EXP}(t)$  medida no enrolamento primário do TSE e da corrente simulada  $I_{AG}(t)$  bem como suas componentes  $I_{Lm}(t)$  e  $I_{Rf}(t)$ . A figura 6.10b apresenta o laço  $\lambda$ - $i$  experimental e simulado.



**Figura 6.10 – Simulação com  $R_f$  e  $X_m$  variáveis: (a) Correntes experimental e simuladas; (b) Laço  $\lambda$ - $i$  experimental e simulado.**



Novamente, há concordância entre as formas de onda da corrente experimental e simulada, o que demonstra a validade do modelo. O laço  $\lambda-i$  simulado está de acordo com o obtido experimentalmente. Pode-se observar na figura 6.10a que a corrente na resistência de perdas  $R_f$  é distorcida devido à variação deste parâmetro no tempo.

Uma comparação entre as figura 6.8 e 6.10 permite afirmar que a variação da resistência de perdas  $R_f$  no tempo modela com melhor precisão tanto a corrente quanto o laço  $\lambda-i$ .

### **6.3 Análise Comparativa entre Resultados dos Ensaios Utilizando Instrumentação Convencional e Não-Convencional**

Uma vez obtidos os resultados, estes podem ser comparados. A tabela 6.3 reúne os resultados obtidos nos ensaios empregando instrumentação convencional e os obtidos de forma não-convencional.

A corrente de excitação (valor eficaz) e as perdas em carga no método não-convencional são calculadas de forma semelhante às apresentadas pela equação 5.14 e 5.13, respectivamente. Ambos os cálculos da regulação e rendimento foram baseados nas condições nominais de operação, com fator de potência unitário no enrolamento secundário, conforme especificado pela norma. As limitações de tensão e corrente das bancadas de ensaio impediram a obtenção de resultados confiáveis para o transformador 2.

**Tabela 6.3 – Resultados obtidos pelo método convencional e não-convencional.**

	Transformador 1			Transformador 2		
	Método convencional	Método não-convencional	Diferença [%]	Método convencional	Método não-convencional	Diferença [%]
Perdas em vazio [W]	12,896	15,257	18,308	31,915	–	–
Corrente de excitação [A]	0,273	0,293	7,326	0,590	–	–
Perdas em carga [W]	12,000	11,824	1,467	60,000	–	–
Impedância de curto-circuito [ $\Omega$ ]	5,2632	4,9152	6,612	1,3824	1,3724	0,723
Impedância de curto-circuito [%]	3,6364	3,5137	3,374	4,2727	–	–
Regulação [%]	3,6013	3,2945	8,519	4,0108	–	–
Rendimento [%]	93,0503	92,4861	0,606	94,2261	–	–

Observa-se uma diferença significativa entre alguns dos resultados, principalmente os referentes às perdas em vazio. Uma vez que os instrumentos convencionais têm suas escalas ajustadas para a leitura de grandezas senoidais, não há garantia de que as leituras sejam corretas para formas de onda que incluam harmônicos. Já os instrumentos não-convencionais consideram os efeitos da não-linearidade do transformador. Desse modo, o método não-convencional, e os resultados obtidos a partir dele, são mais confiáveis.

## 6.4 Conclusão

Este capítulo apresentou um procedimento para obtenção dos parâmetros dos enrolamentos, um modelo do núcleo que leve em consideração sua não-linearidade e uma metodologia para a estimação de seus parâmetros. Os resultados experimentais necessários foram obtidos com uma bancada de caracterização de materiais magnéticos e utilizando instrumentação não-convencional.

Foi verificado que o transformador em curto-circuito pode ser representado por um modelo com parâmetros constantes. Com isso, a não-linearidade é representada por parâmetros variantes no tempo para modelar o núcleo do transformador.

A análise comparativa entre os resultados dos ensaios conforme as normas técnicas e ensaios utilizando instrumentação não-convencional apontou diferenças entre os resultados dos dois métodos. Estes resultados demonstram a necessidade de emprego de instrumentos de medida adequados para investigação das perdas magnéticas.

## Capítulo 7

### Conclusões

Este trabalho abordou métodos de ensaio relacionados à obtenção de parâmetros e características de desempenho dos transformadores de potência. Os resultados obtidos estão associados à qualidade do equipamento, logo devem ser obtidos de forma adequada de modo a se ter uma avaliação correta do equipamento ensaiado. Também foram abordados modelos equivalentes em regime permanente e métodos para obtenção de modelos que levem em consideração as não-idealidades envolvidas.

O segundo capítulo apresentou os conceitos básicos envolvidos na operação de um transformador de potência, e no terceiro, foram descritos os procedimentos para ensaios de transformadores de potência conforme as normas técnicas. Os resultados destes ensaios permitem obter os parâmetros do modelo convencional do transformador.

No quarto capítulo foi comprovado que o AG pode ser usado como uma ferramenta eficiente na estimação de parâmetros através do ajuste de curvas. No capítulo 5, ele foi empregado na determinação de modelos equivalentes do transformador a partir de dados obtidos em ensaios utilizando instrumentação convencional e não-convencional. Foi verificado que um modelo com parâmetros constantes não representa corretamente a forma de onda peculiar da corrente de excitação, rica em harmônicos. Como o transformador é um equipamento altamente não-linear, deve ser modelado de forma adequada. Neste trabalho, tal não-linearidade foi modelada através de elementos variantes no tempo.

Por fim, no capítulo 6 foi proposto um procedimento para determinação dos parâmetros dos enrolamentos baseado em resultados de ensaios não-convencionais. Foi verificado que um modelo com parâmetros constantes representa corretamente o comportamento do transformador em curto-circuito. Com isso, a não-linearidade é representada por parâmetros variantes no tempo para modelar o núcleo do transformador.

Foi proposto um algoritmo para estimação dos parâmetros do modelo do núcleo baseado em resultados obtidos com uma bancada de caracterização de materiais

ferromagnéticos. Os resultados adquiridos permitiram obter um modelo que representa corretamente tanto a corrente de excitação quanto o laço  $\lambda$ - $i$ . Uma comparação destes resultados aos adquiridos nos ensaios conforme as normas técnicas apontaram diferenças entre eles. Estas diferenças estão relacionadas à imprecisão dos instrumentos.

Com relação às perdas magnéticas, o procedimento proposto pelas normas consiste em empregar instrumentação convencional para a leitura das grandezas elétricas, caso constatada uma distorção na forma de onda da tensão de alimentação as perdas devem ser referidas à tensão senoidal. A norma propõe uma correção para as perdas baseada no fator de forma da tensão. Contudo, as perdas são função da variação da indução no tempo e, com isso, um conteúdo harmônico interage distintamente em cada tipo de perda (por histerese, por correntes induzidas e excedentes) [7]. Por este motivo, a correção proposta pela norma é inadequada quando se requer precisão.

Ainda tratando de perdas magnéticas, a não-linearidade do material magnético introduz um conteúdo harmônico na corrente de excitação. Os instrumentos convencionais não medem com a precisão adequada, sendo desaconselhados para este fim. Isto porque tais instrumentos têm suas escalas ajustadas para a leitura de grandezas senoidais, de modo que não há garantia de que as leituras sejam corretas para formas de onda que incluam harmônicos. Por considerar os efeitos da não-linearidade do transformador, o método não-convencional produz resultados mais confiáveis.

Os transformadores ensaiados têm potências relativamente baixas. Em transformadores com potências mais elevadas, os parâmetros dos enrolamentos são consideravelmente superiores aos parâmetros do núcleo. Pode-se sugerir como continuidade deste trabalho:

- A aplicação do procedimento aqui apresentado na obtenção do modelo de transformadores de maior potência e transformadores trifásicos;
- A caracterização do material magnético do núcleo do transformador a fim de obter valores precisos de  $W_h$  e  $W_f$  bom como  $W_e$  (perdas por excesso, relativas à  $W_m$ ). Com isso, a perda referida à tensão senoidal pura é calculada de forma mais precisa;
- A aplicação do algoritmo na obtenção do modelo do motor de indução, uma vez que este é semelhante ao do transformador.

O transformador 1 foi o único a ser ensaiado na bancada de caracterização de materiais magnéticos. Isso prejudicou a análise comparativa entre os métodos

convencional e não-convencional. Pode-se sugerir como continuidade deste trabalho, além das citadas anteriormente, o ensaio de um número maior de transformadores a fim de validar a eficiência do método.

## Anexo A

### Transformadores Ensaaiados e Instrumentos Convencionas Utilizados

Os transformadores ensaiados neste trabalho são denominados transformador 1 e transformador 2. Seus dados de placa e informações adicionais encontram-se a seguir.

---

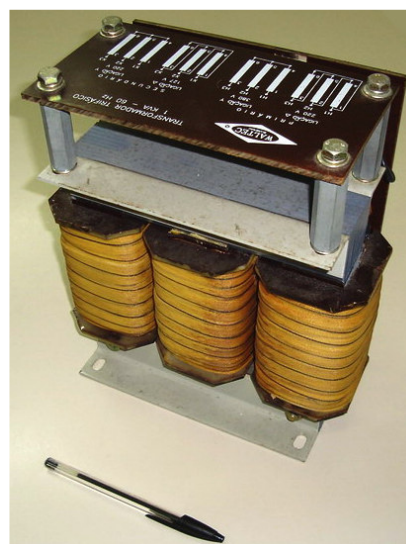
#### Transformador 1

---

**Dados de placa:** transformador trifásico, 1kVA, 60Hz, primário 220V/380V, secundário 127V/220V, dois enrolamentos por fase.

**Informações adicionais:** todos os ensaios foram realizados no enrolamento central (os outros enrolamentos em aberto). Desta forma, o objeto de ensaio é utilizado como um transformador monofásico.

Enquanto não vigorarem normas aplicáveis especificamente a este transformador, ele poderá ser ensaiado conforme a NBR 5380, mesmo que não atenda aos requisitos de potência mínima especificada por esta norma.



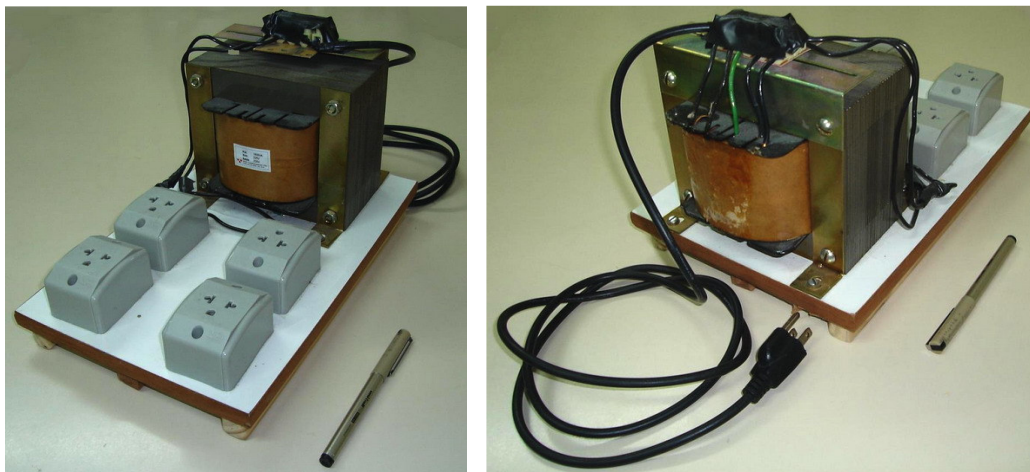
---

## Transformador 2

---

**Dados de placa:** transformador monofásico, 1,5kVA, 60Hz, primário 220V, secundário 220V, dois enrolamentos.

**Informações adicionais:** neste trabalho, todos os ensaios foram realizados com alimentação pelo enrolamento que está conectado a um cabo com 1,2m de comprimento, e este enrolamento é chamado de enrolamento de alta tensão, mesmo o transformador tendo relação de transformação 1:1.



---

## Instrumentos Convencionais Utilizados

---

**Amperímetro de valor eficaz:**

YOKOGAWA Electric Works Ltd. Escalas: 2A, 10A. Índice de classe: 0,5%.

**Wattímetro:**

ENGRO mod. 71. Escalas: 120W, 240W, 600W, 1200W. Índice de classe: 0,5%.

**Voltímetro de valor eficaz:**

ENGRO mod. 71. Escalas: 120V, 250V e 500V. Índice de classe: 0,5%.

**Voltímetro de valor médio:**

YOKOGAWA Electric Works Ltd. Escalas: 75V, 150V, 300V. Índice de classe: 1%. O voltímetro de valor médio é graduado em valor eficaz, ou seja, indica o valor médio multiplicado por 1,11.





## Referências Bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Transformador de Potência: Terminologia*. NBR 5458. Rio de Janeiro, 1986.
- [2] Literatura Técnica: Transformadores Secos. Disponível em: [www.weg.com.br](http://www.weg.com.br).
- [3] GREENE, David J.; GROSS, Charles A. Nonlinear Modeling of Transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Nashville, v. 24, p. 434-438, maio-jun. 1988.
- [4] CHEN, X. S; NEUDORFER, Paul. Digital Modeling of Modern Single-Phase Distribution Transformers. *IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, Hong Kong, p. 914-920, nov. 1991.
- [5] PEDRA, Joaquín; CÓRCOLES, Felipe; SAINZ, Luis. et al. Harmonic Nonlinear Transformer Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, abr. 2004.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Transformador de Potência: Método de Ensaio*. NBR 5380. Rio de Janeiro, 1993.
- [7] BATISTELA, Nelson Jhoe. *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício*. Florianópolis, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [8] MENDES, Filomena Barbosa Rodrigues. *Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício*. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [9] ELLEUCH, Mohammed; POLOUJADOFF, Michel. Analytical Model of Iron Losses in Power Transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 39, p. 973-979, mar. 2003.
- [10] PEDRA, Joaquín; CÓRCOLES, Felipe; SAINZ, Luis. et al. PSPICE Computer Model of a Nonlinear Three-Phase Three-Legged Transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 200-207, v. 19, jan. 2004.
- [11] CHANG, G; HATZIADONIU, C; XU, W. et al. Modeling Devices with Nonlinear Voltage-Current Characteristics for Harmonic Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 1802-1810, out. 2004.
- [12] BAGHZOUZ, Y.; GONG, X. D. Voltage-Dependent Model for Teaching Transformer Core Nonlinearity. *IEEE Transactions on Power Systems*, Seattle, v. 8, p. 746-752, maio 1993.

- [13] BAODONG, Bai; DEXIN, Xie; JIEFAN, Cui. et al. Optimal Transposition Design of Transformer Windings by Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Magnetics*, China, v. 31, p. 3572-3574, nov. 1995.
- [14] HUI, Li; LI, Han; BEI, He. et al. Application Research Based on Improved Genetic Algorithm for Optimum Design of Power Transformers.
- [15] THILAGAR, S. Hosimin; RAO, G. Sridhara. Parameter Estimation of Three-Winding Transformers using Genetic Algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, p. 429-437, nov. 2002.
- [16] *Magnetic Circuits and Transformers*. 14. ed. Massachusetts : M.I.T. Press, 1943.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Transformador de Potência: Especificação*. NBR 5356. Rio de Janeiro, 1993.
- [18] DOWELL, P. L. Effects of Eddy Currents in Transformer Windings. *IEE Proceedings*, Inglaterra, v. 113, ago. 1966.
- [19] SOARES, Gustavo Luís. *Algoritmos Genéticos: Estudos, Novas Técnicas e Aplicações*. Belo Horizonte, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
- [20] BAZARAA, Mokhtar S.; SHETTY, C. M. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. New York : John Wiley & Sons, 1979.
- [21] ÁVILA, Sérgio Luciano; LIMA, Charles Borges de; CARPES JR., Walter Pereira. et al. Otimização – Conceitos Básicos, Ferramentas e Aplicações.
- [22] JOHNSON, J. Michael; RAHMAT-SAMII, Yahya. Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, p. 7-21, v. 39, ago. 1997.
- [23] BIANCHI, N.; BOLOGNANI, S. Design Optimization of Electric Motors by Genetic Algorithms. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, p. 475-483, v. 145, set. 1998.
- [24] ÁVILA, Sérgio Luciano. *Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletoras*. Florianópolis, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [25] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Nova York : Addison Wesley Longman Inc., 1989.

- [26] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; KUSKO, Alexander. *Máquinas Elétricas*. São Paulo : McGraw Hill., 1975.
- [27] LabView.exe, versão 7.1. Programa para banco de ensaios com instrumentos virtuais. National Instruments Corporation.