

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Santhiago Guedes Montenegro

Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO DE PERDAS EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS
UTILIZANDO TÉCNICAS DIGITAIS DE MEDIÇÃO**

Campina Grande

2006

SANTHIAGO GUEDES MONTENEGRO

Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO DE PERDAS EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS
UTILIZANDO TÉCNICAS DIGITAIS DE MEDIÇÃO**

Relatório apresentado à Coordenação de
Graduação em Engenharia Elétrica da
UFCG, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro
Eltricista.

**Orientador: Prof. Francisco das Chagas
Fernandes Guerra**

Campina Grande

2006



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Santhiago Guedes Montenegro

Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO DE PERDAS EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS
UTILIZANDO TÉCNICAS DIGITAIS DE MEDIÇÃO**

Relatório apresentado à Coordenação de
Graduação em Engenharia Elétrica da
UFCG, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Aprovado em _____ de _____ de 2006

Banca Examinadora

Francisco das Chagas Fernandes Guerra
Orientador

Professor Convidado

*Aos meus pais, sem os
quais não teria chegado
aqui. Foram muito mais
para mim que pernas e
braços.*

Agradecimentos

A Deus, por suas infinitas bênçãos e consolo inaudito.

Agradeço ao professor Chagas, que em muito colaborou com a realização deste trabalho.

Aos colegas Thierry Adolfo L. B. Agostinho e Maria Magdalena R. Cabral, que durante todo o curso deram assistência e apoio na horas difíceis.

Lista de Figuras

FIGURA 1: MOMENTO DE UM DIPOLO MAGNÉTICO GERADO POR UM LAÇO DE CORRENTE.....	13
FIGURA 2 (A) MOMENTO MAGNÉTICO ORBITAL; (B) MOMENTO MAGNÉTICO DE SPIN.....	14
FIGURA 3: ALINHAMENTO DOS DIPOLOS MAGNÉTICOS SOB A AÇÃO DE UM CAMPO EXTERNO EM MATERIAIS: (A) AMAGNÉTICO, (B) ANTIFERROMAGNÉTICO, (C) FERRIMAGNÉTICO E (D) FERROMAGNÉTICO.....	16
FIGURA 4: VARIAÇÕES TÍPICAS DE M_e E DE M EM FUNÇÃO DE H PARA OS MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS, PARAMAGNÉTICOS E FERROMAGNÉTICOS.....	18
FIGURA 5: DOMÍNIOS EM UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	20
FIGURA 6: CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO DE UM CRISTALITO (A) SEM PAREDE DE SEPARAÇÃO DE DOMÍNIOS; (B) COM PAREDE DE SEPARAÇÃO.....	21
FIGURA 7: FORMAÇÃO DE DOMÍNIOS COMO MEIO DE REDUÇÃO DA ENERGIA MAGNETOSTÁTICA.....	21
FIGURA 8: DIREÇÕES DE MAGNETIZAÇÃO EM UM CRISTAL CÚBICO DE FERRO.....	22
FIGURA 9: PAREDE DE SEPARAÇÃO DE DOMÍNIOS.....	23
FIGURA 10: PROCESSO DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL DE UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	25
FIGURA 11: NÚCLEO MAGNÉTICO EXCITADO EM CORRENTE CONTÍNUA.....	26
FIGURA 12: LAÇO DE HISTERESE DE UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	27
FIGURA 13: ENCURVAMENTO DAS PAREDES DOS DOMÍNIOS AO SE PRENDEREM AOS LIMITES DO GRÃO.....	28
FIGURA 14: AVALIAÇÃO GRÁFICA DAS PERDAS POR HISTERESE.....	30
FIGURA 15: CURVA DE MAGNETIZAÇÃO OBTIDA A PARTIR DE UM CONJUNTO DE LAÇOS DE HISTERESE.....	32
FIGURA 16: CORRENTES PARASITAS EM UM MATERIAL MAGNÉTICO.....	33
FIGURA 17: CORRENTES PARASITAS EM UMA LÂMINA.....	35
FIGURA 18: ALARGAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE CAUSADO PELAS CORRENTES PARASITAS.....	37
FIGURA 19: VARIAÇÃO DAS PERDAS HISTERÉTICAS, PARASÍTICAS CLÁSSICAS, ANÔMALAS E TOTAIS.....	38
FIGURA 20: LAÇO DE HISTERESE DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLE E DURO.....	41
FIGURA 21: LAÇOS DE HISTERESE TÍPICOS DE AÇOS GO E GNO.....	46
FIGURA 22: DIFERENTES FORMAS DE PERFIS DE LÂMINAS.[2].....	49
FIGURA 23: CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR [3].....	50
FIGURA 24: CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR REFERIDO A UM DOS LADOS.....	50
FIGURA 25: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO.....	51

FIGURA 26: DIAGRAMA DE FIAÇÃO PARA O TESTE DE CIRCUITO ABERTO DO TRANSFORMADOR.....	52
FIGURA 27: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O TRANSFORMADOR EM ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO.....	53
FIGURA 28: DIAGRAMA DE FIAÇÃO PARA TESTE DE CIRCUITO ABERTO.....	55
FIGURA 29: DIAGRAMA DE MONTAGEM PARA ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO.....	56
FIGURA 30: DIAGRAMA DE MONTAGEM PARA ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO.....	60
FIGURA 31: DIAGRAMA DE MONTAGEM PARA LEVANTAMENTO DO LAÇO DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	65
FIGURA 32: CURVA TENSÃO CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL DO TRANSFORMADOR GNO.....	67
FIGURA 33: FLUXO CONCATENADO NO PRIMÁRIO VERSUS CORRENTE DE PICO CIRCULANTE NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR GNO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	71
FIGURA 34: INDUÇÃO MAGNÉTICA VERSUS CAMPO MAGNÉTICO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL NO TRANSFORMADOR GNO.....	72
FIGURA 35: CURVA TENSÃO CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL DO TRANSFORMADOR GO.....	76
FIGURA 36: FLUXO CONCATENADO NO PRIMÁRIO VERSUS CORRENTE DE PICO CIRCULANTE NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR GO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	78
FIGURA 37: INDUÇÃO MAGNÉTICA VERSUS CAMPO MAGNÉTICO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL NO TRANSFORMADOR GO.....	79
FIGURA 38: CURVA TENSÃO CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL DO TRANSFORMADOR TOROIDAL.....	81
FIGURA 39: FLUXO CONCATENADO NO PRIMÁRIO VERSUS CORRENTE DE PICO CIRCULANTE NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR GO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	83
FIGURA 40: INDUÇÃO MAGNÉTICA VERSUS CAMPO MAGNÉTICO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL NO TRANSFORMADOR TOROIDAL.....	86
FIGURA 41: DIAGRAMA DE MONTAGEM PARA REGISTRO DO CICLO DE HISTERESE.....	88
FIGURA 42: CICLO DE HISTERESE FLUXO-CORRENTE PARA TRANSFORMADOR GO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.....	89
FIGURA 43: CICLO DE HISTERESE B-H PARA TRANSFORMADOR GO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.....	90
FIGURA 44: CICLO DE HISTERESE FLUXO-CORRENTE PARA TRANSFORMADOR GO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.2 P.U.....	91
FIGURA 45: CICLO DE HISTERESE B-H PARA TRANSFORMADOR GO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.2 P.U.....	92
FIGURA 46: CICLO DE HISTERESE FLUXO-CORRENTE PARA TRANSFORMADOR GNO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.....	93
FIGURA 47: CICLO DE HISTERESE B-H PARA TRANSFORMADOR GNO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.....	94

FIGURA 48: CICLO DE HISTERESE FLUXO-CORRENTE PARA TRANSFORMADOR GNO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.2 P.U.	95
FIGURA 49: CICLO DE HISTERESE B-H PARA TRANSFORMADOR GNO COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.2 P.U.	96
FIGURA 50: CICLO DE HISTERESE FLUXO-CORRENTE PARA TRANSFORMADOR TOROIDAL COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.	97
FIGURA 51: CICLO DE HISTERESE B-H PARA TRANSFORMADOR TOROIDAL COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.	98
FIGURA 52: CICLO DE HISTERESE FLUXO-CORRENTE PARA TRANSFORMADOR TOROIDAL COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.	99
FIGURA 53: CICLO DE HISTERESE B-H PARA TRANSFORMADOR TOROIDAL COM TENSÃO DE ENTRADA DE 1.0 P.U.	100
FIGURA 54: CURVA DE HISTERESE B-H DOS TRÊS TRANSFORMADORES SOBREPOSTOS EM 1.0 P.U. DE TENSÃO DE ENTRADA.	101
FIGURA 55: CURVA VI DOS 3 TRAFOS SOBREPOSTOS.	102

Lista de Tabelas

TABELA 1: PERDAS TÍPICAS EM AÇOS GO E GNO.....	47
TABELA 2: DADOS COLETADOS PARA ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO NO TRANSFORMADOR GO.....	56
TABELA 3: DADOS COLETADOS PARA ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO NO TRANSFORMADOR DE NÚCLEO GNO.....	57
TABELA 4: DADOS COLETADOS PARA ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO NO TRANSFORMADOR TOROIDAL.....	58
TABELA 5: DADOS COLETADOS PARA ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO NO TRANSFORMADOR GNO.....	59
TABELA 6: DADOS COLETADOS PARA ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO NO TRANSFORMADOR GO.....	59
TABELA 7: TENSÃO E CORRENTE PRIMÁRIA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL MEDIDAS NO TRANSFORMADOR GNO	67
TABELA 8: FLUXO CONCATENADO E CORRENTE DE PICO PARA TRANSFORMADOR GNO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	69
TABELA 9: INDUÇÃO MAGNÉTICA E CAMPO MAGNÉTICO NO TRANSFORMADOR GNO EM AMGNETIZAÇÃO INICIAL.....	72
TABELA 10: TENSÃO E CORRENTE PRIMÁRIA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL MEDIDAS NO TRANSFORMADOR GO	74
TABELA 11: FLUXO CONCATENADO E CORRENTE DE PICO PARA TRANSFORMADOR GO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	76
TABELA 12: INDUÇÃO MAGNÉTICA E CAMPO MAGNÉTICO NO TRANSFORMADOR GO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	79
TABELA 13: TENSÃO E CORRENTE PRIMÁRIA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL MEDIDAS NO TRANSFORMADOR TOROIDAL.....	81
TABELA 14: FLUXO CONCATENADO E CORRENTE DE PICO PARA TRANSFORMADOR GO EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	83
TABELA 15: INDUÇÃO MAGNÉTICA E CAMPO MAGNÉTICO NO TRANSFORMADOR TOROIDAL EM MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	84

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.2 METODOLOGIA.....	12
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	13
2.1 DIPOLO MAGNÉTICO.....	13
2.2 MOMENTOS MAGNÉTICOS ATÔMICOS.....	14
2.3 FORMAS DE ALINHAMENTO DOS DIPOLOS MAGNÉTICOS.....	15
2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS SEGUNDO AS CONSTANTES MAGNÉTICAS.....	17
2.5 MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS.....	19
2.5.1 Domínios magnéticos.....	19
2.5.2 Energia magnetostática.....	20
2.5.3 Energia de anisotropia magnetocristalina.....	22
2.5.4 Paredes de separação dos domínios magnéticos.....	23
2.6 MAGNETIZAÇÃO INICIAL DE UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	24
2.7 PERDAS HISTERÉTICAS.....	26
2.7.1 O laço de histerese.....	26
2.7.2 Origem das perdas por histerese.....	27
2.7.3 Cálculo das perdas por histerese.....	28
2.8 SATURAÇÃO.....	31
2.9 PERDAS PARASÍTICAS CLÁSSICAS.....	32
2.9.1 Descrição geral do fenômeno.....	32
2.9.2 Cálculo das perdas parasíticas clássicas.....	34
2.9.3 Correntes parasitas e laço de histerese.....	36
2.10 PERDAS ANÔMALAS.....	38
Descrição geral do fenômeno.....	38
2.10.1 Cálculo das perdas anômalas.....	39
2.11 PERDAS MAGNÉTICAS TOTAIS.....	40
2.12 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS ACERCA DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	40
Materiais magnéticos moles e duros.....	40
2.12.1 Materiais magnéticos moles.....	41
Considerações gerais.....	41
2.12.1.1 Melhoria das propriedades magnéticas.....	42
2.13 A CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	49
2.13.1 Teste de circuito aberto.....	50
2.13.2 Teste de curto-circuito.....	53
3. MEDIÇÕES.....	55
3.1 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO.....	55
3.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO.....	57
3.3 LEVANTAMENTO DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL.....	63
Dados coletados.....	65
3.3.1 Transformador G.N.O. 1 kVA.....	66
3.3.2 Transformador G.O.....	74
3.3.3 Transformador toroidal.....	81
3.4 REGISTRO DO CICLO DE HISTERESE EM 60 HZ.....	87
3.4.1 Transformador G.O.....	88
3.4.2 Transformador GNO.....	92
3.4.3 Transformador Núcleo toroidal.....	96
4. CONCLUSÃO.....	103
5. BIBLIOGRAFIA.....	104
ANEXOS.....	105

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é estudar perdas em transformadores levando em consideração o material utilizado em seu núcleo. O estudo das propriedades dos materiais magnéticos constitui um passo fundamental tal. Assim, apresenta-se neste trabalho uma breve revisão de aspectos microscópicos relacionados à teoria dos domínios magnéticos, com o objetivo de explicar os fenômenos de saturação, histerese, perdas parasíticas clássicas, perdas anômalas. Uma descrição rigorosa e de caráter quantitativo destes fenômenos requer incursões detalhadas na área de física das partículas, o que foge do objetivo do presente trabalho. A abordagem utilizada limita-se a aspectos compatíveis com os propósitos de um trabalho de engenharia.

Neste trabalho serão utilizados três transformador para efeito de medições, sendo todos estes monofásicos, mudando entretanto, a configuração de seus núcleos. Detalhes sobre esses transformadores podem ser encontrados no anexo deste.

Objetivam-se ainda mensurar essas perdas utilizando instrumentação digital, como microcomputadores com a ajuda de placas de aquisição de dados (PCIB), osciloscópios digitais, multímetros digitais *TRUE RMS*.

1.2 Metodologia

As etapas a serem cumpridas durante o trabalho são as seguintes:

a. Revisão Bibliográfica

b. Caracterização do transformador.

- Medição de resistência e reatância dos enrolamentos do transformador.
- Levantamento da curva de saturação (tensão *RMS* - corrente *RMS*, fluxo de enlace - corrente de excitação).
- Levantamento do laço de histerese em 60 Hz.
- Processamento dos dados (ajuste de curvas).

c. Análise dos resultados.

d. Elaboração de relatório.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Dipolo magnético

A Fig. 1 mostra um laço de corrente percorrido por uma corrente i , o qual, por simplicidade, apresenta uma configuração planar.

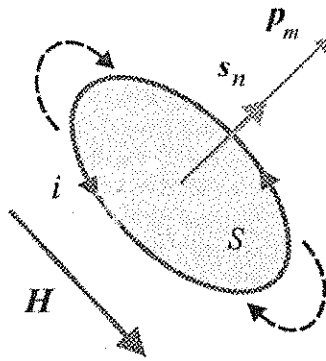


Figura 1: Momento de um dipolo magnético gerado por um laço de corrente.

Define-se “momento magnético” do dipolo, p_m , como sendo a grandeza vetorial dada por

$$p_m = i S s_n \quad (2.1)$$

S é a área limitada pelo percurso e s_n é um vetor unitário normal ao plano do laço. Os sentidos de p_m e s_n , são determinado pela regra da mão direita, tomando-se como base o sentido de i . Na presença de um campo magnético de origem externa, os momentos magnéticos tendem a se alinharem com o vetor intensidade de campo gerado, H , como é indicado na Fig 1.

O torque sobre o dipolo, associado a uma indução magnética B , é dado pelo produto vetorial

$$\tau = p_m \times B \quad (2.2)$$

e a energia do dipolo é

$$E = -p_m \cdot B \quad (2.3)$$

2.2 Momentos magnéticos atômicos

Os efeitos magnéticos nos materiais são causados pelos movimentos orbitais dos elétrons em torno dos núcleos dos átomos e pelos movimentos de *spin* de cada elétron, como mostra a Fig. 2.2. O momento magnético orbital do elétron, p_o , é dado por

$$p_o = \frac{-e\omega r^2}{2} s_n \quad (2.4)$$

onde e é a carga do elétron, ω é a sua velocidade angular, r é o raio da órbita e s_n é um vetor unitário perpendicular ao plano desta última.

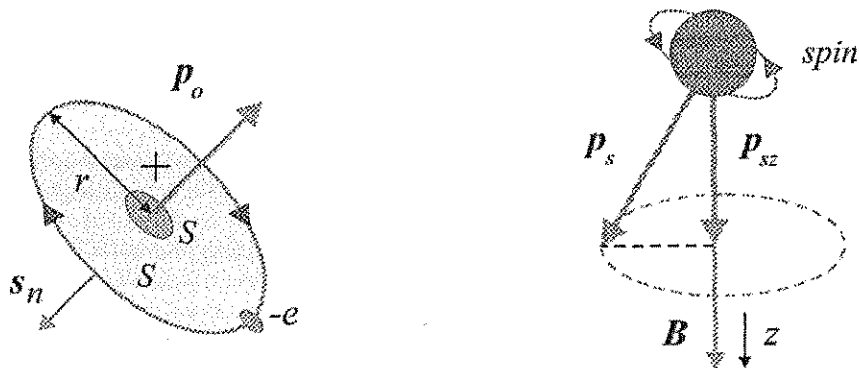


Figura 2 (a) Momento magnético orbital; (b) momento magnético de spin.

O elétron também apresenta um momento magnético de *spin*. Na presença de um campo magnético, o momento de *spin*, p_s , não pode simplesmente girar e alinhar-se com o campo. De acordo com a mecânica quântica, é estabelecido um torque que provoca um movimento precessional em torno da direção de B , como é indicado na Fig. 2 (b), de modo que a componente de p_s , segundo a direção do campo deve ser:

$$p_{sz} = \frac{eh}{4\pi m_e} s_z \quad (2.5)$$

onde h é a constante de Planck, m_e é a massa do elétron e s_z é um vetor unitário na direção z .

A capacidade de alinhamento desses momentos magnéticos mediante a aplicação de um campo magnético bem como a capacidade dos mesmos de se manterem alinhados após esse campo ser removido são fatores fundamentais que definem as propriedades magnéticas dos materiais.

2.3 Formas de alinhamento dos dipolos magnéticos

Na ausência de campos magnéticos externos, os dipolos magnéticos existentes no interior dos materiais normalmente não apresentam um alinhamento resultante. A orientação desses dipolos apresenta um aspecto caótico.

Considerando diferentes materiais submetidos à ação de um campo magnético externo, os dipolos magnéticos no interior dos mesmos podem alinhar-se de diferentes modos. Segundo o modo de alinhamento dos dipolos, os materiais podem ser classificados em amagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos e ferromagnéticos. A Fig. 3 mostra como se processa o alinhamento dos dipolos, na presença de um campo magnético, H .

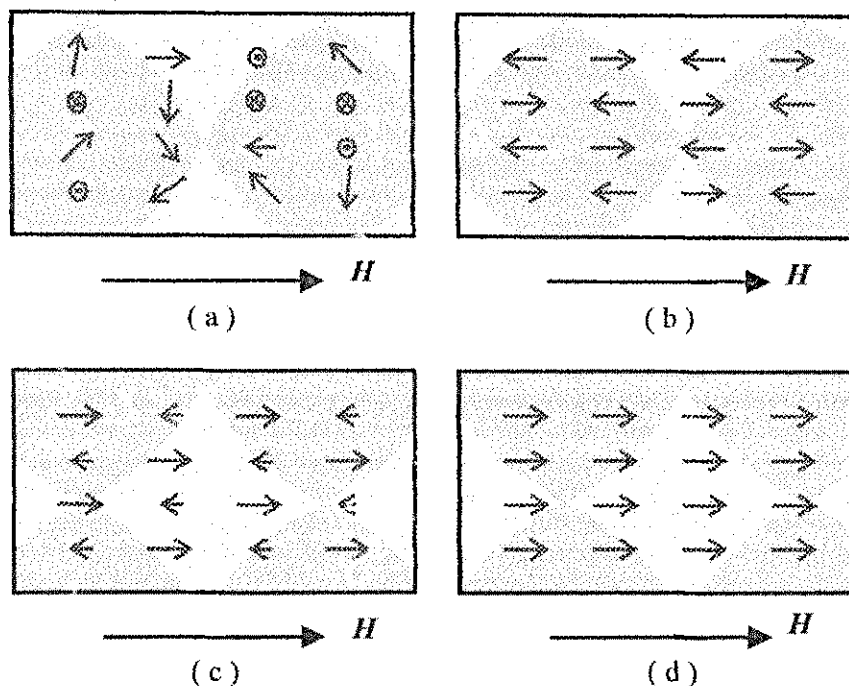


Figura 3: Alinhamento dos dipolos magnéticos sob a ação de um campo externo em Materiais: (a) amagnético, (b) antiferromagnético, (c) ferrimagnético e (d) ferromagnético.

Os materiais amagnéticos continuam a apresentar seus dipolos magnéticos orientados de maneira aleatória na presença do campo magnético H . Os materiais antiferromagnéticos têm os seus dipolos orientados em antiparalelo, não apresentando magnetização resultante. Os materiais ferrimagnéticos também têm seus dipolos em antiparalelo. Porém, os momentos magnéticos desses dipolos apresentam diferentes intensidades, de modo a existir uma magnetização resultante.

No caso dos materiais ferromagnéticos, os dipolos magnéticos acham-se orientados paralelamente ao campo aplicado. Esses materiais apresentam o maior grau de importância na eletrotécnica, uma vez que permitem a obtenção de elevados valores de densidade de fluxo mediante valores relativamente baixos de intensidade de campo, propriedade que é expressa pelos altos valores de permeabilidade magnética apresentados. Isto faz com que sejam aplicados em transformadores e máquinas elétricas, com o objetivo de proporcionarem um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético.

2.4 Classificação dos materiais magnéticos segundo as constantes magnéticas

Define-se o vetor “polarização magnética” ou “magnetização”, M , como sendo o momento magnético resultante no interior de um material por unidade de volume do mesmo.

$$M = (\sum p_m) / V \quad (2.6)$$

O vetor magnetização relaciona-se com o vetor intensidade de campo magnético através da constante de susceptibilidade magnética, χ , da seguinte forma:

$$M = \chi H \quad (2.7)$$

A indução magnética possui duas contribuições: uma contribuição proporcionada pelo campo magnético externo aplicado ao material, H , e outra proporcionada pelo efeito de alinhamento dos dipolos no interior do mesmo. Sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, tem-se para o vetor indução magnética, B :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.8)$$

Substituindo (2.7) em (2.8), obtém-se:

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu H \quad (2.9)$$

O fator μ é a permeabilidade magnética do material.

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad (2.10)$$

Na prática, é mais freqüente utilizar-se a permeabilidade relativa, μ_r , dada por:

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = 1 + \chi \quad (2.11)$$

Segundo a constante χ , classificam-se os materiais em diamagnéticos, paramagnéticos e magnéticos. A Fig. 4 mostra as variações de M e de χ em função de H para esses materiais.

No caso dos materiais magnéticos, a relação $M - H$ é não-linear, ou seja, χ e μ variam em função de H . Neste caso, define-se “susceptibilidade incremental” e “permeabilidade incremental” como sendo, respectivamente:

$$\chi = dM / dH \quad (2.12)$$

$$\mu = dB / dH \quad (2.13)$$

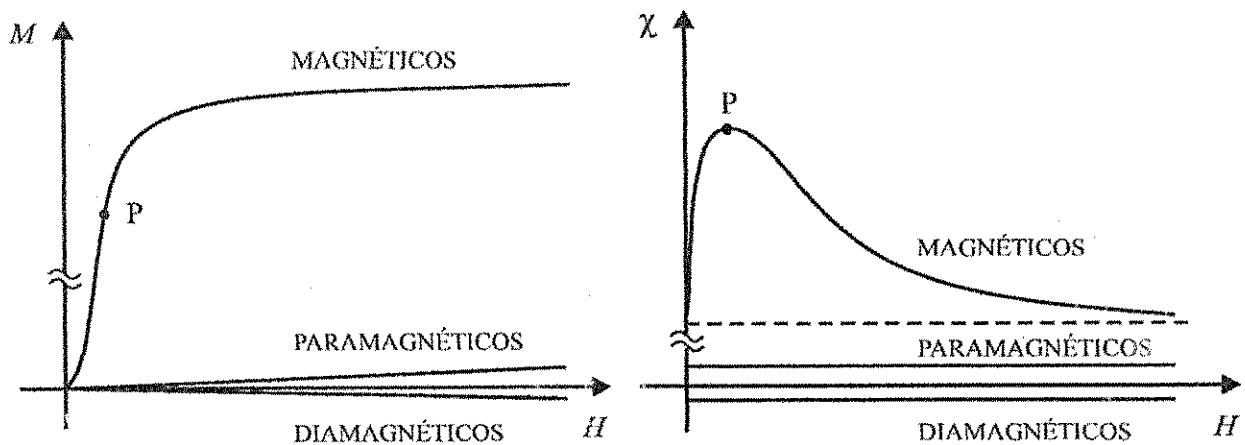


Figura 4: Variações típicas de M e de χ em função de H para os materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Os materiais diamagnéticos apresentam χ negativa, da ordem de -10^{-5} ; assim, $\mu_r < 1$ e $\mu < \mu_0$. Neste caso, o vetor M estabelecido pela orientação dos domínios magnéticos no

interior do material acha-se em oposição ao campo H aplicado, apresentando uma pequena intensidade.

Nos materiais paramagnéticos, χ é positiva e muito pequena, situando-se entre 10^{-3} e 10^{-5} . O vetor M apresenta pequena intensidade e mesmo sentido de H .

A designação “material magnético” é bastante abrangente, envolvendo os materiais ferro- magnéticos (Ferro, Níquel, Cobalto e, a temperaturas abaixo da normal, Gadolínio e Disprósio), materiais ferrimagnéticos (ligas metálicas e não-metálicas, como as ferrites) e ligas especiais (ligas metálicas e ligas amorfas). As curvas de B e de μ em função de H para esses materiais são semelhantes às curvas da Fig. 4. Os materiais ferromagnéticos são os mais empregados na Engenharia Elétrica, razão pela qual dedica-se especial tratamento para os mesmos.

2.5 Materiais ferromagnéticos

2.5.1 Domínios magnéticos

Os materiais ferromagnéticos são constituídos por fragmentos de monocristal, chamados de “cristalitos” ou “grãos”, como mostra a Fig. 5. Cada grão é dividido em sub-regiões nomeadas “domínios”, de dimensões típicas da ordem de 10^{-2} a 10^{-4} cm, separadas por planos micros-cópicos, denominados “paredes de Bloch”. No interior de cada domínio, todos os dipolos magnéticos têm a mesma orientação. Entretanto, se o material não foi anteriormente submetido à ação de campos magnéticos externos, os domínios não apresentam alinhamento resultante, sendo caótica a orientação dos mesmos.

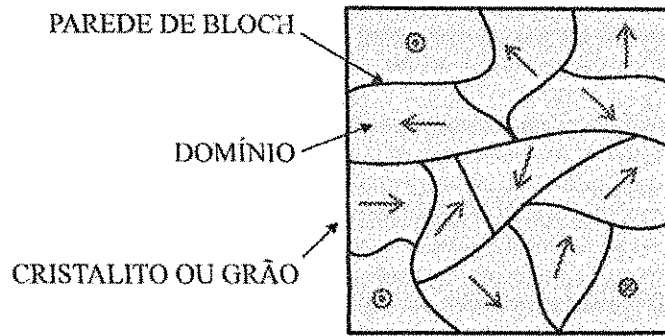


Figura 5: Domínios em um material ferromagnético

A formação dos domínios é explicada pelo princípio de minimização da energia. Diferentes tipos de energia estão envolvidos nesse processo. Os dois tipos mais importantes são a energia magnetostática e a energia de anisotropia magnetocristalina.

2.5.2 Energia magnetostática

Considerando a Fig. 6 (a), mostra-se todos os dipolos magnéticos orientados numa mesma direção no interior do grão.

A energia magnetostática armazenada no campo externo, o qual subentende um volume V , é dada pela expressão:

$$W = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV \quad (2.14)$$

Na Fig. 6 (b), tem-se o grão dividido em dois domínios orientados em antiparalelo. Observa-se que o campo magnético externo está agora confinado em uma região do espaço menor que a região da Fig.6 (a), resultando em um menor valor de energia magnetostática.

A Fig. 7 ilustra aspectos adicionais relacionados ao princípio da minimização de energia e à formação dos domínios magnéticos. Na Fig. 7 (a), a disposição em antiparalelo da

orientação dos dois domínios (domínios de 180°) pode ser entendida mais facilmente quando é lembrado que esta é a forma de equilíbrio estável assumida por dois ímãs em forma de barra quando colocados lado a lado. Nesta posição, a energia do sistema é mínima.

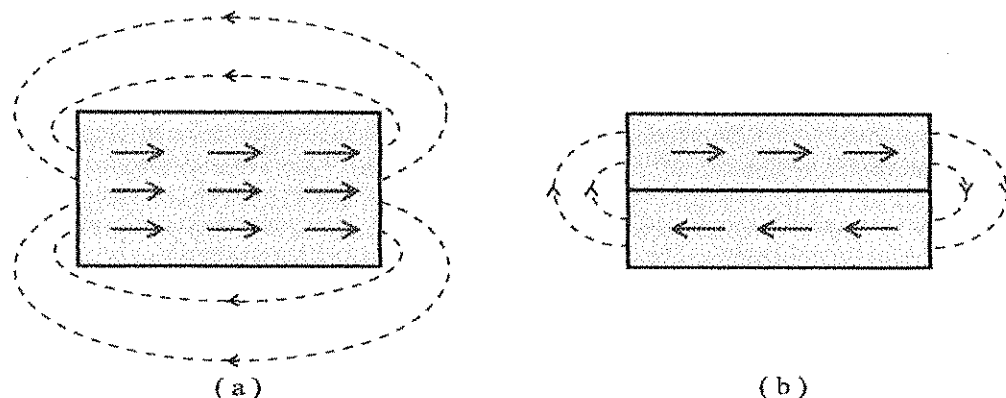


Figura 6: Campo magnético externo de um cristalito (a) sem parede de separação de domínios; (b) com parede de separação.

Na Fig. 7 (b), o número de domínios é aumentado. Esta configuração corresponde a um menor valor de energia magnetostática armazenada. A Fig. 7 (c) mostra os domínios orientados de modo a se formar uma trajetória fechada dentro do grão, constituindo o que

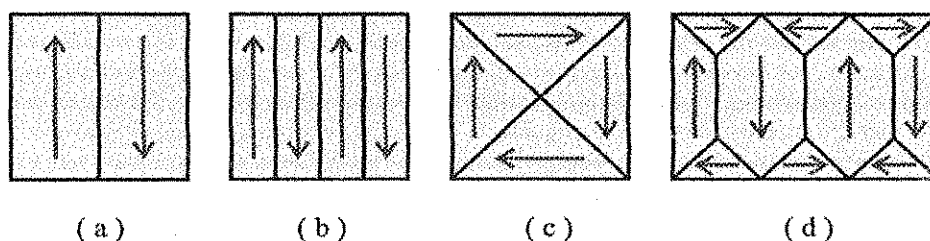


Figura 7: Formação de domínios como meio de redução da energia magnetostática.

se chama de “domínios de fechamento” (domínios de 90°). Em relação às configurações anteriores, esta configuração apresenta um menor valor de energia magnetostática

armazenada. A Fig. 7 (d) mostra a estrutura de domínios observada no Ferro. Observa-se a existência de domínios de fechamento nas extremidades do grão.

2.5.3 Energia de anisotropia magnetocristalina

A propriedade de anisotropia magnetocristalina diz respeito à existência de direções preferenciais de magnetização dos grãos dos materiais. O Ferro possui uma estrutura cristalina cúbica, como mostra a Fig. 8.

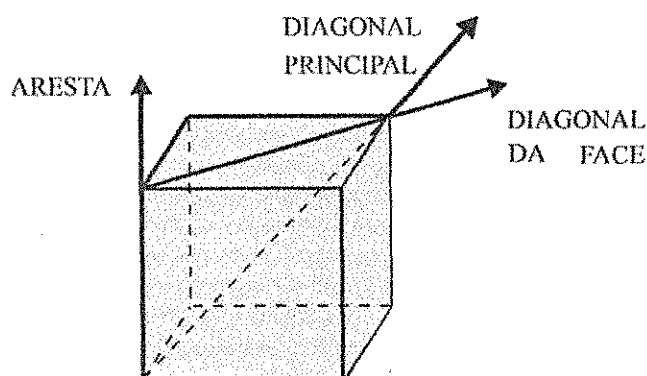


Figura 8: Direções de magnetização em um cristal cúbico de Ferro

Nesta estrutura, a direção de magnetização mais favorável é segundo uma das arestas do cubo. A diagonal de uma das faces representa uma direção de magnetização mais difícil. Finalmente, a direção mais difícil de todas é segundo uma diagonal principal.

O processo de afastamento dos dipólos magnéticos das suas direções preferenciais de magnetização requer armazenamento de energia no material. Esta energia é denominada “energia de anisotropia magnetocristalina”.

2.5.4 Paredes de separação dos domínios magnéticos

A Fig. 9 mostra dois domínios magnéticos adjacentes separados por uma parede que, no caso do Ferro, possui espessura da ordem de 5×10^{-8} m, ou cerca de 200 diâmetros atômicos. Observa-se que não ocorre uma rotação súbita dos momentos magnéticos, e sim, uma rotação gradual de um domínio para o outro à medida que a parede é atravessada, resultando em uma defasagem de 180° entre os momentos magnéticos dos dois domínios.

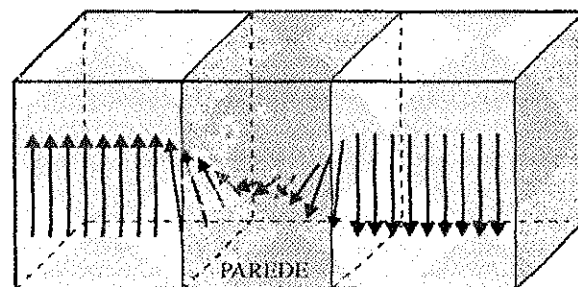


Figura 9: Parede de separação de domínios.

Foi visto que o princípio de formação dos domínios obedece ao princípio da minimização da energia armazenada e quanto maior for o número destes menor será esta energia. Levando em consideração que o tamanho dos domínios varia entre 10^{-2} a 10^{-4} cm, deduz-se que deve haver um efeito físico capaz de impor limites a esta tendência de minimização de energia, de modo a evitar que as dimensões dos domínios se reduzam indefinidamente. Esse efeito físico consiste em um armazenamento de energia associado à formação das paredes de Bloch, processo tal que envolve duas componentes, denominadas “energia de troca” e “energia de anisotropia”.

O conceito de energia de troca é fundamentado na mecânica quântica e não pode ser explicado através da Física Clássica.

Foi visto que a energia de anisotropia magnetocristalina é mínima quando o alinhamento é realizado segundo a direção preferencial de magnetização. Assim, o processo de mudança gradual das direções dos momentos magnéticos implica em um aumento de energia armazenada no interior da parede, o qual é tanto maior quanto maior for a espessura desta última.

2.6 Magnetização inicial de um material ferromagnético

A Fig. 10 mostra o processo de magnetização de um material ferromagnético cujos grãos apresentam orientações espontâneas entre domínios vizinhos que formam ângulos de 90° entre si. A curva $B - H$ mostrada é denominada “curva de magnetização inicial”.

Essa característica acentuadamente não-linear faz com que a permeabilidade μ varie em função de H . Neste caso, define-se “permeabilidade incremental” como sendo:

$$\mu_i = dB / dH \quad (2.15)$$

De 0 a A (zona de Rayleigh), estabelece-se o movimento das paredes, de modo tal que os domínios mais alinhados na direção do campo aplicado tendem a crescer às expensas daqueles alinhados em direções contrárias. Nesta região da curva, os deslocamentos dos limites são reversíveis, ou seja, o material pode retornar à sua condição original se o campo for invertido e reduzido a zero.

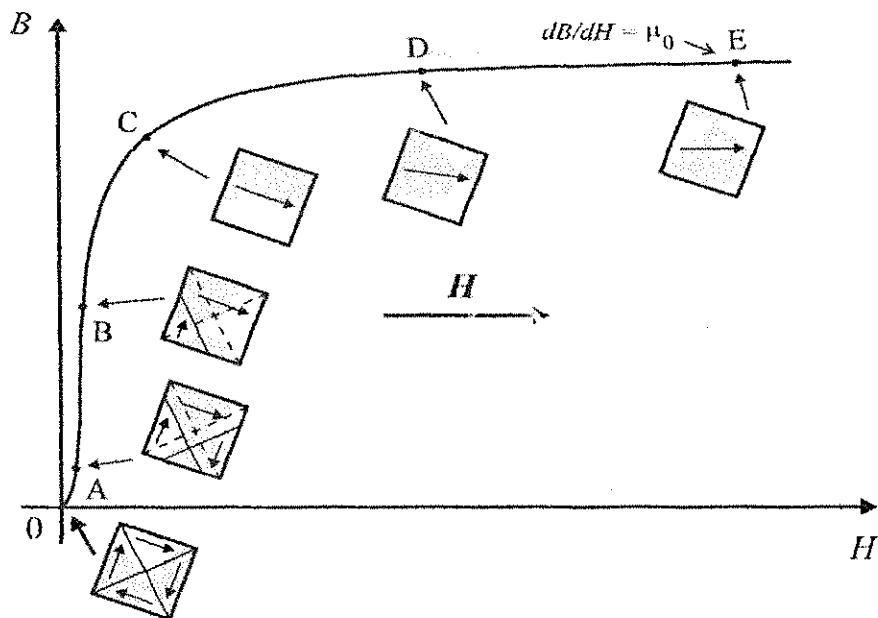


Figura 10: Processo de magnetização inicial de um material ferromagnético.

De A a B prossegue o deslocamento dos domínios, como foi anteriormente descrito. Entretanto, esses deslocamentos são irreversíveis. Se o campo for reduzido a zero, a curva OAB não será mais percorrida. Isto se deve ao fenômeno de histerese, descrito mais adiante.

A partir do ponto C, observa-se que iguais incrementos de H implicam em variações cada vez menores de B . Nesta região, o processo de magnetização é realizado pela rotação dos domínios. Assim, o material entra em estado de saturação. Ao ser atingido um estado de completo alinhamento dos domínios, a permeabilidade incremental alcança o valor da permeabilidade no ar.

2.7 Perdas histeréticas

2.7.1 O laço de histerese

A Fig. 11 mostra um núcleo de material magnético toroidal inicialmente não-magnetizado de área de seção reta S e comprimento médio de trajetória magnética l , em torno do qual há um enrolamento de N espiras. A fonte indicada fornece tensão contínua, variável e reversível, a qual, ao ser variada em módulo e polaridade, produz um laço de histerese como o mostrado na Fig. 12. Considerando o sentido indicado pelas setas, parte-se da origem 0 e leva-se o material ao estado de saturação, efetuando-se variações lentas de intensidade e de sentido no campo H , de modo simétrico. Tal processo resulta no conhecido "laço de histerese".

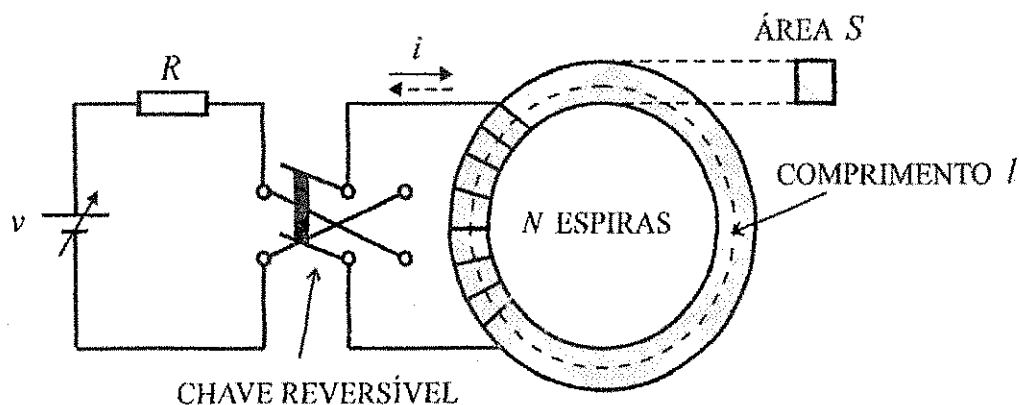


Figura 11: Núcleo magnético excitado em corrente contínua.

Observa-se que, após o material ter sido magnetizado, a redução de H até zero não implica na anulação de B , de modo que o mesmo apresenta $B \neq 0$ para $H = 0$.

Denomina-se "indução remanescente" a indução existente no material quando o campo magnético aplicado é reduzido a zero. Se o material foi anteriormente levado à saturação, a indução remanescente é chamado de "remanência" (B_r). Assim, a remanência é o máximo valor que a indução remanescente pode alcançar.

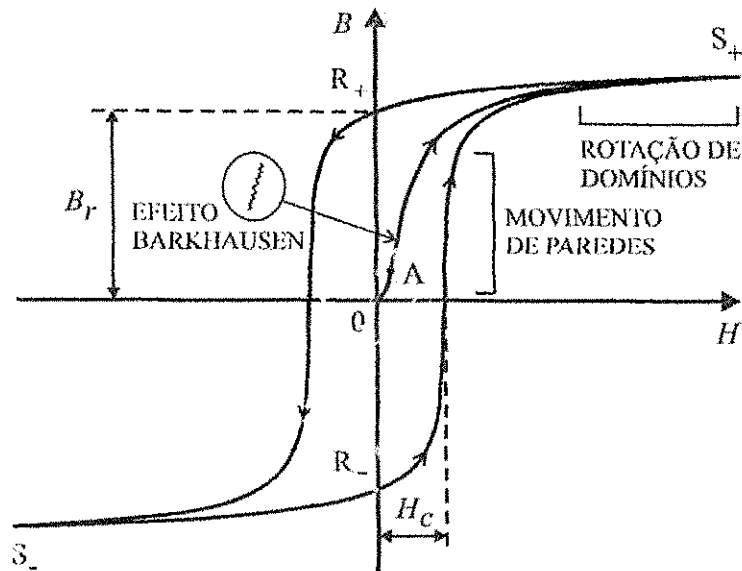


Figura 12: Laço de histerese de um material ferromagnético.

Denomina-se “força coercitiva” o valor do campo reverso necessário para anular a indução no material, a partir da indução remanescente. Se essa indução remanescente for igual à remanência, a força coercitiva denomina-se “coercitividade” (H_c).

2.7.2 Origem das perdas por histerese

Como foi anteriormente descrito, o primeiro estágio do processo de magnetização de um material realiza-se com o movimento das paredes dos domínios. Entretanto, existe um impedimento ao livre movimento das mesmas. Os fatores que contribuem para esse impedimento são as fronteiras dos grãos, as imperfeições cristalográficas e as partículas de impurezas não-magnéticas, denominadas “locais prendedores”. Há uma tendência de que as extremidades das paredes fiquem presas a esses locais, de modo que, para haver deslocamento das mesmas, há a necessidade de fornecimento de uma parcela extra de energia, a qual corresponde às perdas por histerese. O efeito de interação entre os domínios e a anisotropia também são tidos como causas da histerese magnética.

Para baixos campos magnéticos aplicados, as paredes de baixa energia inicialmente assumem uma forma curva, como mostra a Fig. 13, uma vez que se acham presas às fronteiras do grão.

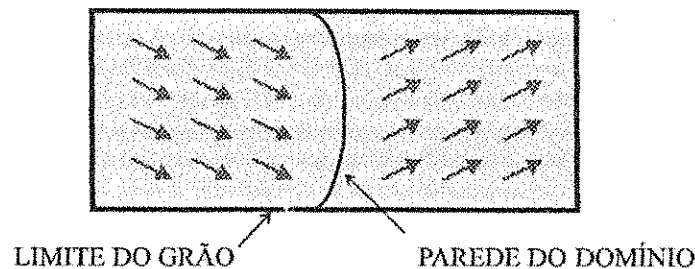


Figura 13: Encurvamento das paredes dos domínios ao se prenderem aos limites do grão.

Esse processo é reversível, pois, ao se reduzir o campo para um valor nulo, a parede volta a sua posição original, desde que seu raio de curvatura não alcance um valor crítico. Tal comportamento caracteriza a região OA do laço da Fig 12. Além de A, a parede se desprende, saltando para outros locais de prendimento, de modo a realizar um processo irreversível. Tal fenômeno é conhecido como “efeito Barkhausen”, o qual pode ser detectado na forma de som (pequenos estalos) por um instrumento de alta sensibilidade.

No caso das paredes de alta energia, elas praticamente não se encurvam ao se desprenderem, assumindo uma forma aproximadamente planar enquanto o movimento se processa.

2.7.3 Cálculo das perdas por histerese

Considera-se o núcleo da Fig. 11 inicialmente magnetizado no ponto de remanência negativa R_- da Fig. 12, de modo a não se considerar a curva de magnetização inicial $0 - S_+$. Sendo $\lambda = N\phi$ o fluxo de enlace na bobina, a potência instantânea fornecida pela fonte é:

$$p = vi = i d\lambda / di \quad (2.16)$$

A variação de energia no circuito magnético no intervalo de tempo entre t_1 e t_2 é dada por

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p_i dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda \quad (2.17)$$

Pela lei circuital de Ampère e pela definição de fluxo de enlace, pode-se escrever:

$$i = Hl / N \quad (2.18)$$

$$\lambda = NSB \quad (2.19)$$

$$W = \int_{B_1}^{B_2} (Hl / N) NS dB = lS \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (2.20)$$

Assim, a variação de energia do sistema é:

$$W = lS \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (2.21)$$

O produto lS representa o volume do ferro. Ao completar-se um ciclo, as perdas de energia devido à histerese, por unidade de volume do material, correspondem ao valor da área no interior do laço de histerese, ou seja:

$$w = \oint H dB \quad (2.22)$$

A Fig. 14 mostra trechos do laço, onde as áreas hachuradas correspondem às variações de energia por unidade de volume do sistema.

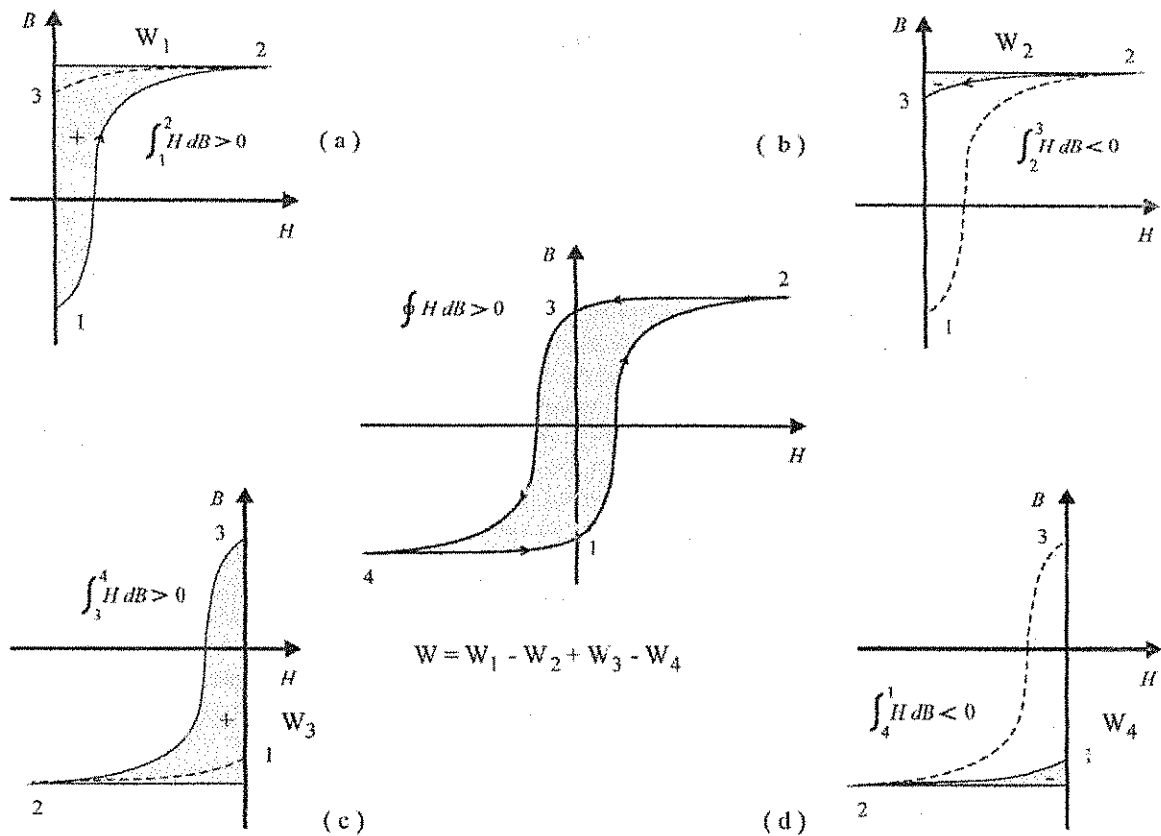


Figura 14: Avaliação gráfica das perdas por histerese.

Pode-se ver que em (a) e em (c) o núcleo absorve energia da fonte e em (b) e em (d) o núcleo devolve energia à mesma.

É fácil notar que a quantidade de energia absorvida pelo sistema é menor que a retornada à fonte ao completar-se o ciclo. A diferença corresponde ao valor da área no interior do laço. Conclui-se, pois, que as perdas por histerese no ciclo completo, por unidade de volume, correspondem a esse valor de área.

Nas especificações industriais de aços usados em transformadores e demais equipamentos destinados a operação em corrente alternada, é mais usual fornecer as perdas específicas, em W/kg, ao invés das perdas volumétricas, em J/m³. As perdas específicas podem ser calculadas pela fórmula empírica de Steinmetz.

$$P_h = K_h f B_m^x \quad (2.23)$$

f é a frequência de operação; B_m é o valor de pico da densidade de fluxo; K_h e x são constantes que dependem do material e do valor de pico de indução magnética.

2.8 Saturação

A saturação é o fenômeno mais importante que ocorre nos materiais magnéticos. O mesmo se manifesta de modo que, ao se aumentar além de um certo valor o campo magnético aplicado no material, os acréscimos obtidos para a indução magnética são cada vez menores. Em grande parte dos casos, pode-se desprezar o efeito de histerese, sendo suficiente representar a relação $B - H$ do material por uma curva singular, levando-se em conta apenas a saturação.

A Fig. 15 mostra uma família de laços de histerese, os quais correspondem a diferentes valores de pico de indução magnética. Por serem simétricos em relação ao eixo H , somente são mostradas as porções do primeiro e do segundo quadrante. O lugar geométrico descrito pelas extremidades dos vários laços é denominado "curva de saturação" ou "curva de magnetização".

Cumprir observar que esta curva difere da curva de magnetização inicial, pois esta última é obtida a partir da aplicação de um campo magnético crescente ao material inicialmente desmagnetizado.

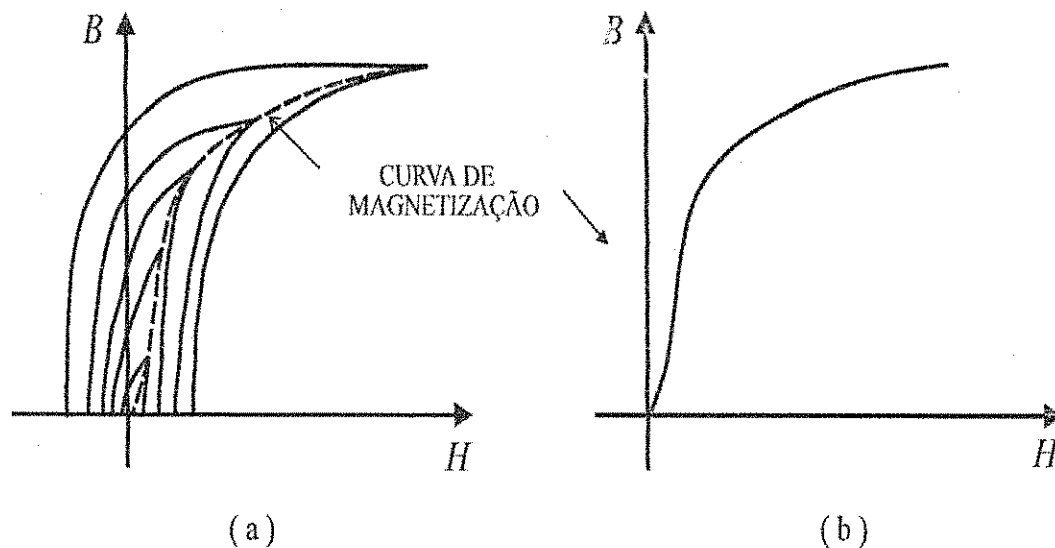


Figura 15: Curva de magnetização obtida a partir de um conjunto de laços de histerese.

2.9 Perdas parasíticas clássicas

2.9.1 Descrição geral do fenômeno

Na Fig. 16, um toro de material magnético é submetido a um campo produzido por uma bobina na qual circula uma corrente alternada. Como o fluxo produzido pela bobina é variável, irão surgir correntes que circulam em planos perpendiculares à direção do campo aplicado no material, sendo estas denominadas "correntes parasitas" ou "correntes de Foucault".

Pela lei de Lenz, vê-se que a corrente i e o fluxo ϕ por ela produzido estão aumentando, pois os sentidos indicados para as correntes parasitas tendem a criar o fluxo em oposição a ϕ .

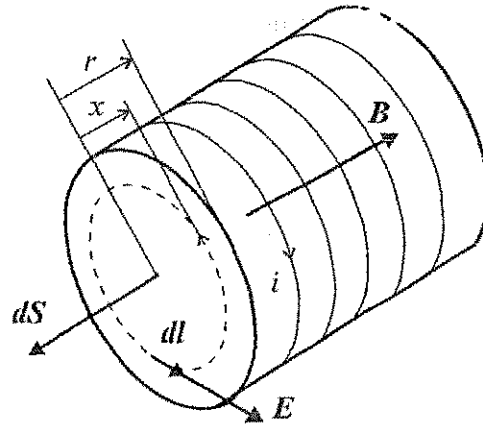


Figura 16: Correntes parasitas em um material magnético.

Na Fig. 16, pela lei de Faraday, tem-se:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.24)$$

onde E é o campo elétrico tangente à trajetória pontilhada; $d\vec{l}$ é o vetor elemento de comprimento ao longo da trajetória pontilhada, colinear a E ; $d\vec{S}$ é o vetor elemento de área, perpendicular ao plano da trajetória. Além disso, tem-se:

$$\phi_x = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.25)$$

onde ϕ_x é o fluxo magnético circundado pela trajetória de raio x .

De (2.24) e (2.25):

$$E = \frac{l}{2\pi x} \cdot \frac{d\phi_x}{dt} \quad (2.26)$$

Sendo ρ a resistividade do material, o vetor densidade de corrente é dado por:

$$J = E/\rho \quad (2.27)$$

De (2.26) e (2.27), resulta:

$$J = \frac{1}{2\pi \rho x} \cdot \frac{d\phi_x}{dt} \quad (2.28)$$

A densidade de corrente é máxima no meio da seção reta do material ($x = 0$) e é mínima na superfície externa ($x = r$). Isto indica que o efeito de oposição ao fluxo criado pela bobina é máximo no centro e menor nas bordas. Assim, o fluxo resultante tende a se concentrar mais na superfície externa do material. Este fenômeno é conhecido como "efeito pelicular magnético". O efeito pelicular magnético agrava ainda mais os problemas de perda de energia, uma vez que a concentração da corrente em torno do ponto central implica na subutilização da região mais distante do mesmo, fazendo com que haja uma redução na área de seção reta efetiva do material.

2.9.2 Cálculo das perdas parasíticas clássicas

A Fig. 17 mostra uma lâmina de material ferromagnético, onde se supõe uniforme a densidade de fluxo na seção reta do material. Isto torna-se mais aceitável à medida que a espessura c é reduzida. A trajetória de corrente indicada pela linha tracejada encerra um fluxo ϕ_x , dado por:

$$\phi_x = 2xy \cdot B \quad (2.29)$$

Como $y \gg x$, pode-se escrever, pela lei de Faraday:

$$E_x \cdot 2y = \frac{d\phi_x}{dt} \quad (2.30)$$

Substituindo (2.29) em (2.30):

$$E_x = x \cdot \frac{dB}{dt} \quad (2.31)$$

A uma distância x do plano central da lâmina, a densidade de corrente J_x é:

$$J_x = \frac{E_x}{\rho} = \frac{x}{\rho} \frac{dB}{dt} \quad (2.32)$$

A perda instantânea de potência em todo o volume da lâmina é dada por:

$$p_e(t) = \int_V \rho J_x^2 dV = \int_{-c/2}^{c/2} \rho \left(\frac{x}{\rho} \frac{dB}{dt} \right)^2 yz dx \quad (2.33)$$

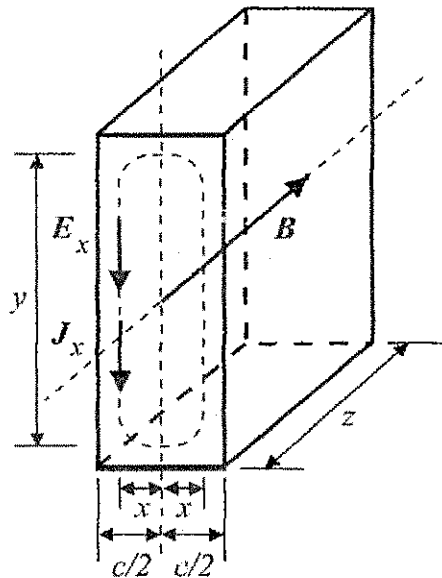


Figura 17: Correntes parasitas em uma lâmina.

$$p_e(t) = \frac{c^3 yz}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (2.34)$$

A perda instantânea de potência em todo o volume de um núcleo de várias lâminas é:

$$P_e(t) = \frac{c^2}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 S l \quad (2.35)$$

onde S é a seção reta do núcleo e l é o comprimento médio da trajetória magnética.

Se $B = B_m \text{sen}(\omega t)$, as perdas médias são dadas por:

$$p_v = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{c^2 \omega^2 B_m^2}{12\rho} \cos^2(\omega t) d(\omega t) = \frac{c^2 \omega^2 B_m^2}{24\rho} \quad (2.36)$$

Resolvendo a integral, fazendo $\omega = 2\pi f$, e dividindo pelo produto $d \cdot S \cdot l \cdot f$, onde d é a densidade do material, obtém-se as perdas parasíticas específicas, p_e , em J / kg.

$$p_e = \frac{(\pi c f B_m)^2}{6\rho d} \quad (2.37)$$

Fazendo

$$K_e = \frac{c^2}{12\rho d} \quad (2.38)$$

e substituindo (2.38) em (2.35) e em (2.37), tem-se:

$$P_e(t) = K_e \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dSl \quad (2.39)$$

$$p_e / f = 19.7392 K_e B_m^2 f \quad (2.40)$$

2.9.3 Correntes parasitas e laço de histerese

À medida que o campo magnético varia de modo cada vez mais lento, as correntes parasitas induzidas no material diminuem de intensidade. O laço de histerese obtido em CC ou mediante variação lenta de campo magnético é denominado “laço de histerese estática”. Entretanto, em corrente alternada, o laço de histerese tende a tornar-se mais

largo, devido ao efeito das correntes parasitas induzidas. Este laço é conhecido como “laço de histerese dinâmico”. Ambos os tipos de laço são mostrados na Fig. 18.

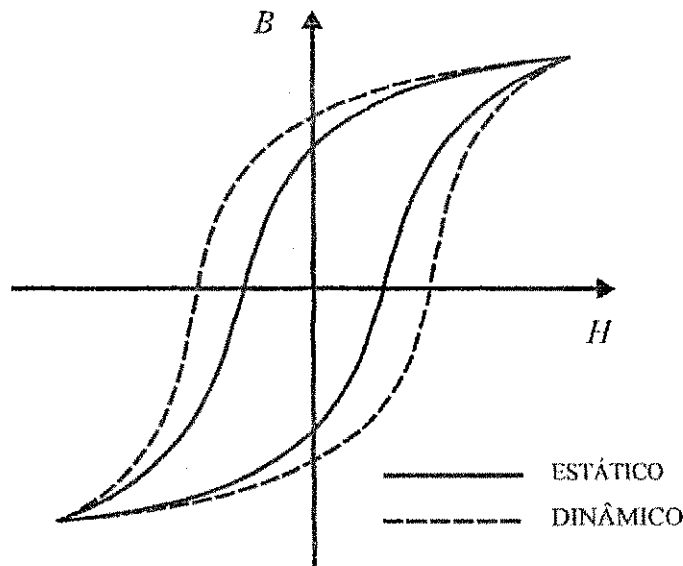


Figura 18: Alargamento do laço de histerese causado pelas correntes parasitas.

Este efeito pode ser explicado da seguinte maneira: as correntes parasitas produzem uma força magnetomotriz que atua em oposição à força magnetomotriz produzida pela bobina. Para que seja mantido o mesmo valor de fluxo, é necessário que a corrente da bobina seja aumentada, aumentando também o campo H aplicado. Assim, em corrente alternada, considerando um mesmo valor de pico de indução magnética, o laço de histerese torna-se cada vez mais largo à medida que a frequência aumenta.

2.10 Perdas anômalas

Descrição geral do fenômeno

Considerando as equações (2.23) e (2.40), a soma das perdas histeréticas e das perdas parasíticas em materiais magnéticos, em J / kg , denominadas “perdas clássicas”, é:

$$p_{he} / f = K_h B_m^x + 19.7392 K_e B_m^2 f \quad (2.41)$$

Para um certo valor de B_m , p_{he} / f varia linearmente em relação a f . Entretanto, medições realizadas em laboratório indicam que as perdas são maiores que as calculadas por (2.36). Isto é indicado na Fig. 19, onde a curva superior representa as perdas específicas totais medidas.

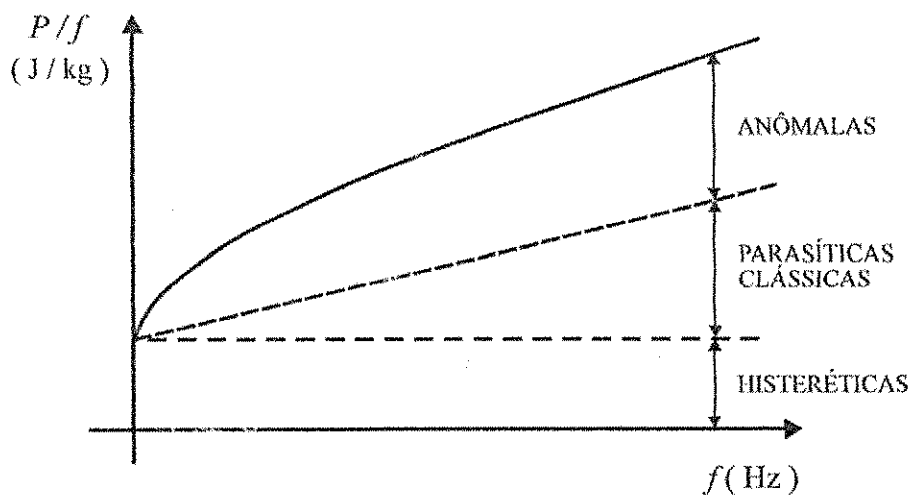


Figura 19: Variação das perdas histeréticas, parasíticas clássicas, anômalas e totais.

A parcela que excede o valor calculado por (2.41) corresponde às chamadas “perdas anômalas”. Estas perdas apresentam maior taxa de crescimento entre 0 e 30 Hz, chegando a representar aproximadamente 50% das perdas totais.

Ainda não há uma explicação completa para a origem das perdas anômalas. Cita-se como a causa principal o fato de que nos materiais policristalinos não ocorre uma magnetização uniforme nos grãos, havendo sobrecarga nos grãos orientados na direção de magnetização.

Em relação à Fig. 19, deve-se registrar que as retas associadas às perdas histeréticas e às perdas parasíticas clássicas representam uma visão aproximada da realidade. Através de medições magnetoestáticas de movimentos dos domínios, constatou-se que as perdas por histerese sofrem um certo aumento quando a frequência cresce. Além do mais, no cálculo das perdas por correntes parasitas, ignorou-se o efeito pelicular magnético, supondo-se uniforme a densidade de corrente na área de seção reta do material.

2.10.1 Cálculo das perdas anômalas

Considerando K_a como sendo o coeficiente de perdas anômalas, empiricamente as perdas anômalas instantâneas, em Watts, são dadas por:

$$P_a(t) = K_a (dB/dt)^{3/2} d.S.l \quad (2.42)$$

Se $B = B_m \sin(2\pi ft)$, as perdas anômalas médias valem:

$$P_a = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_a [2\pi f B_m \cos(2\pi ft)]^{3/2} d(\omega t) \right] d.S.l \quad (2.43)$$

Resolvendo a integral e dividindo pelo produto $[d.S.l.f]$, obtém-se as perdas anômalas específicas, em J/kg:

$$P_a / f = 8.7634 K_a^{3/2} f^{1/2} \quad (2.44)$$

2.11 Perdas magnéticas totais

De (2.41) e (2.44), as perdas magnéticas específicas totais, por ciclo, valem:

$$p/f = K_h B_m^x + 19.7392 B_m^2 K_e f + 8.7634 K_a B_m^{3/2} f^{1/2} \quad (2.45)$$

Esta equação descreve a curva superior da Fig. 19.

2.12 Considerações adicionais acerca dos materiais magnéticos

Materiais magnéticos moles e duros

Os materiais magnéticos destinam-se principalmente a:

- Proporcionar um caminho de baixa permeabilidade para o fluxo magnético; em outras palavras, destinam-se a maximizar o coeficiente de acoplamento magnético entre circuitos magneticamente acoplados, minimizando o fluxo de dispersão (aplicação mais comum, realizada em transformadores, geradores e motores);
- Atuar como fonte primária de fluxo magnético (aplicação em ímãs permanentes).

A primeira aplicação requer o emprego de materiais magnéticos moles, enquanto que a segunda requer materiais magnéticos duros (laço de histerese em CC largo).

A Fig. 20 mostra os laços de histerese típicos desses materiais.

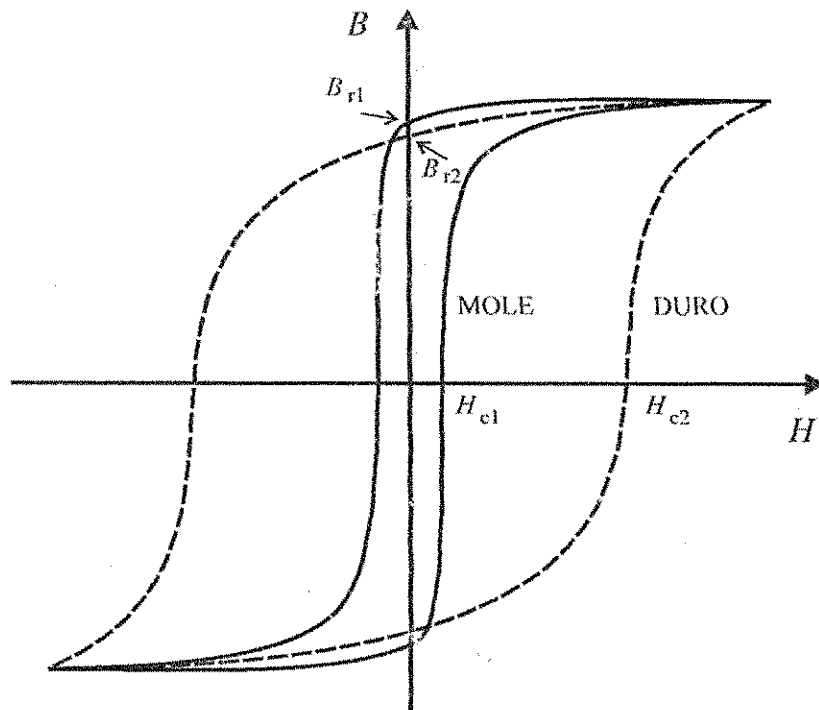


Figura 20: Laço de histerese de materiais magnéticos mole e duro.

2.12.1 Materiais magnéticos moles

Considerações gerais

A qualidade de um material magnético mole é tanto melhor quanto mais pronunciadas forem as seguintes características:

- Elevada indução no ponto de saturação (indução B_{r1} com o maior valor possível);
- elevada permeabilidade (trechos do laço de histerese em CC o mais próximo possível da vertical na região não-saturada);
- baixas perdas histeréticas (coercitividade H_{c1} baixa, laço de histerese em CC estreito);
- baixas perdas parasíticas (laço de histerese em CA estreito na frequência de operação);
- efeito de magnetostrição o menos pronunciado possível.

Essas características são obtidas da maneira descrita a seguir.

2.12.1.1 Melhoria das propriedades magnéticas

Pode-se melhorar os materiais magnéticos moles através de:

- Utilização de núcleos laminados;
- adição de Silício ao Ferro;
- orientação e tratamento dos grãos;
- corte das lâminas em 45° e,
- tratamento a laser.

2.12.1.1.1 Utilização de núcleos laminados

A equação (2.37) mostra que as perdas parasíticas nos núcleos magnéticos crescem com o quadrado da espessura da lâmina e com o quadrado frequência. Assim, em corrente alternada, ao invés de material maciço, utilizam-se lâminas com espessuras de 0,23, 0,27, 0,30, 0,35 ou 0,50 mm, sendo 0,30 e 0,35 mm as mais usuais. Essas lâminas são empilhadas e isoladas umas das outras com um verniz que impede a circulação de correntes parasitas entre elas.

Denomina-se “fator de empilhamento”, k , a relação entre a área de seção reta ocupada apenas pelo material magnético, S_m , e a área de seção reta total, S_t , levando em consideração as espessuras das camadas de verniz isolante entre as lâminas, ou seja

$$k = S_m / S_t \quad (2.46)$$

onde $0 < k < 1$. Obviamente, quanto maior for k , menor será o núcleo magnético.

Para frequências mais altas, as espessuras das lâminas são reduzidas, situando-se de 0,02 a 0,05 mm. Porém, lâminas de pequena espessura apresentam custos de fabricação elevados e proporcionam baixos fatores de empilhamento. No caso de pequenos transformadores, à medida que a frequência se eleva, torna-se necessário buscar outras soluções, como o emprego de ligas especiais.

2.12.1.1.2 Adição de silício

Próximo de 1900 foi desenvolvido na Inglaterra um processo no qual era adicionado Silício ao Ferro. Por volta de 1905 foi iniciada a produção industrial dessa liga nos Estados Unidos.

A adição do Silício ao Ferro, em pequenas percentagens, produz os seguintes efeitos:

- melhoria das propriedades mecânicas (puncionabilidade, estampabilidade e elasticidade);
- redução da magnetostrição, de modo que uma percentagem de 6 ½ % de Silício praticamente elimina esse efeito;
- aumento da permeabilidade magnética;
- redução da fadiga magnética, contribuindo para manter inalteradas as perdas histeréticas e a permeabilidade magnética ao longo do tempo;
- aumento da resistividade elétrica das lâminas, implicando na redução das perdas parasíticas.

Entretanto, apesar de todos esses benefícios, não se usa percentagens de Silício superiores a 4%, pois, além disso, cai o valor da indução para a qual o material satura. Teores acima de 5% tornam o material quebradiço e de difícil laminação.

Denominam-se “aços GNO” (aços de grãos não-orientados) as ligas Fe-Si nas quais as perdas são reduzidas pela simples adição de Silício às lâminas de ferro, sem o emprego do processo de orientação de grãos, descrito mais adiante. O emprego dos aços GNO é feito em geradores, motores, transformadores de pequeno porte, reatores, relés e medidores eletromecânicos, além de outros equipamentos que operam em frequências no entorno de 60 Hz. As lâminas são fabricadas com espessuras típicas de 0,30 a 0,50 mm.

2.12.1.1.3 Orientação e tratamento dos grãos

Face à limitação no uso dos teores de Silício, foi desenvolvida uma metodologia que estabelece os mesmos em um máximo de 4%, melhorando-se as propriedades das ligas através de outros meios. Em 1934, nos Estados Unidos, foi desenvolvido um método de produção de chapas de Ferro-Silício de grãos orientados, denominadas “aços GO”, nas quais são realizados os seguintes processos:

- laminação a quente;
- dois estágios de laminação a frio, com processo intermediário de recozimento e descarbonetação;
- recozimento final a alta temperatura.

O processo de laminação a frio no sentido de magnetização preferencial dos grãos faz com que a propriedade de anisotropia magnetocristalina seja melhor aproveitada.

O processo de recozimento e descarbonetação é realizado elevando-se a temperatura do material a centenas de graus Celsius em forno de atmosfera com hidrogênio e nitrogênio, fazendo-se com que haja crescimento dos grãos orientados segundo a direção preferencial de magnetização. Quando o tamanho do grão aumenta, as perdas parasíticas também aumentam, mas as perdas histeréticas diminuem, de modo que a soma dessas perdas diminui até um valor mínimo para um certo tamanho de grão, passando a aumentar quando esse tamanho é ultrapassado. A presença de carbono causa o envelhecimento (fadiga) das propriedades magnéticas do material, além de reduzir a indução de saturação e aumentar a força coercitiva. Assim, a descarbonetação é feita no sentido de melhorar e preservar as propriedades magnéticas dos materiais ao longo da vida útil do equipamento.

O corte das lâminas produz deformações nos cristais, o que altera o sentido preferencial de magnetização no sentido do corte. Para contornar o problema, o material é novamente recozido. A ação de dilatação elimina as tensões internas, fazendo com que o cristal deformado recupere a sua forma original.

A Fig. 21 mostra o aspecto típico do laço de histerese de um aço GO, comparado com o laço de histerese um aço GNO (aço de grãos não-orientados).

O aço GO possui laço estreito (pequena coercitividade), apresentando uma forma aproximadamente retangular, com um pequeno raio de curvatura entre as regiões não-saturada e saturada, bem como alta permeabilidade na região não-saturada. Considerando o trecho S1-S2 do laço, o valor de energia necessário para causar a rotação dos domínios, por unidade de volume do material, é

$$W = \int_{S1}^{S2} H dB$$

(2.47)

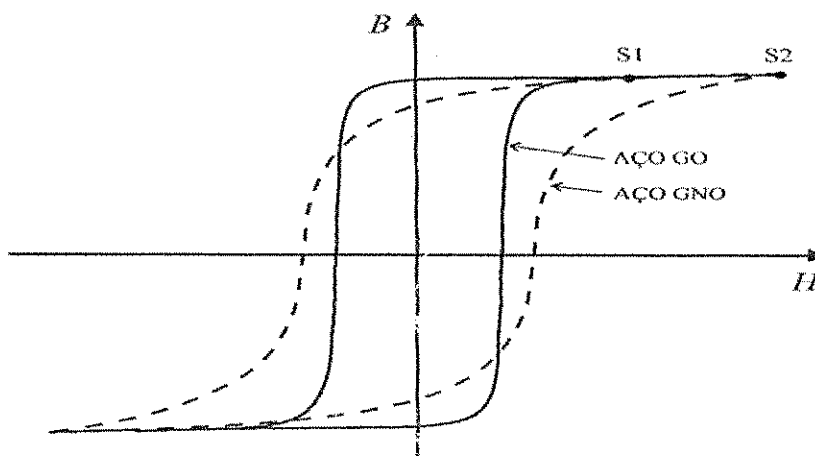


Figura 21: Laços de histerese típicos de aços GO e GNO.

O ramo S1-S2 apresenta pequena inclinação. Logo, a energia requerida para a rotação dos domínios é menor que a requerida pelos aços de grãos não-orientados (aços GNO), uma vez que o material foi laminado segundo a direção preferencial de magnetização dos grãos.

A Tabela 1 mostra as perdas magnéticas típicas em W / kg para os aços GO e GNO. O tipo GNO apresentado é o que possui as melhores propriedades magnéticas entre os aços dessa categoria. Entretanto, vê-se que o mesmo não proporciona as vantagens do aço GO, tanto em termos de indução máxima de trabalho como em termos de perdas magnéticas.

Em relação à magnetostricção nos aços GO, constata-se que o mesmo apresenta intensidade mínima quando o campo é aplicado na direção de orientação dos grãos. Em contrapartida, a intensidade máxima ocorre para o campo aplicado a 90° em relação a essa direção.

Tabela 1: Perdas típicas em aços GO e GNO.

MATERIAL	PERDAS MAGNÉTICAS MÁXIMAS (W / kg)					
	1.0 T		1.5 T		1.7 T	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
AÇO GO 0.30 mm	0.38	0.50	0.88	1.16	1.34	1.71
AÇO GNO 0.35 mm	1.00	1.28	2.53	3.20	-	-

Os aços GO são aplicados em dispositivos onde os fluxos magnéticos percorrem núcleos de posição fixa, no sentido mais favorável à magnetização. Esse é o caso de transformadores usados nos sistemas de transmissão e de distribuição de energia, assim como de transformadores de corrente e de potencial (TP's e TC's), usados nesses sistemas para baixar tensões e correntes para alimentar medidores e relés de proteção.

Entretanto, os aços GO não são adequados para o uso em máquinas rotativas, uma vez que a rotação das partes móveis produziria sensível elevação de perdas e variação na permeabilidade em posições fora do eixo de magnetização preferencial.

2.12.1.1.4 Corte das lâminas em 45°

A Fig. 22 mostra diversas formas de corte de lâminas de núcleos magnéticos. É possível observar que os perfis estampados em U, L e I apresentam consideráveis porções de trajetória de fluxo magnético não-coincidentes com as direções preferenciais de magnetização das lâminas (DPM's) indicadas pelas setas. O problema é menos grave no perfil em I. Entretanto, obtém-se uma significativa melhoria quando as lâminas são cortadas em 45°. Neste caso, há uma boa concordância entre as trajetórias do fluxo e das DPM's.

2.12.1.1.5 Tratamento a laser

Desenvolvimentos tecnológicos mais recentes realizados por indústrias japonesas proporcionaram o desenvolvimento de aços-silício de grãos altamente orientados (*HGO Laser Scribed*), os quais apresentam permeabilidades mais elevadas e perdas menores que as apresentadas pelos aços GO convencionais. Tais melhorias são obtidas mediante um processo tecnológico relativamente sofisticado, o qual consiste no tratamento superficial das lâminas por meio de raio laser, de modo a minimizar as imperfeições na estrutura cristalina do material.

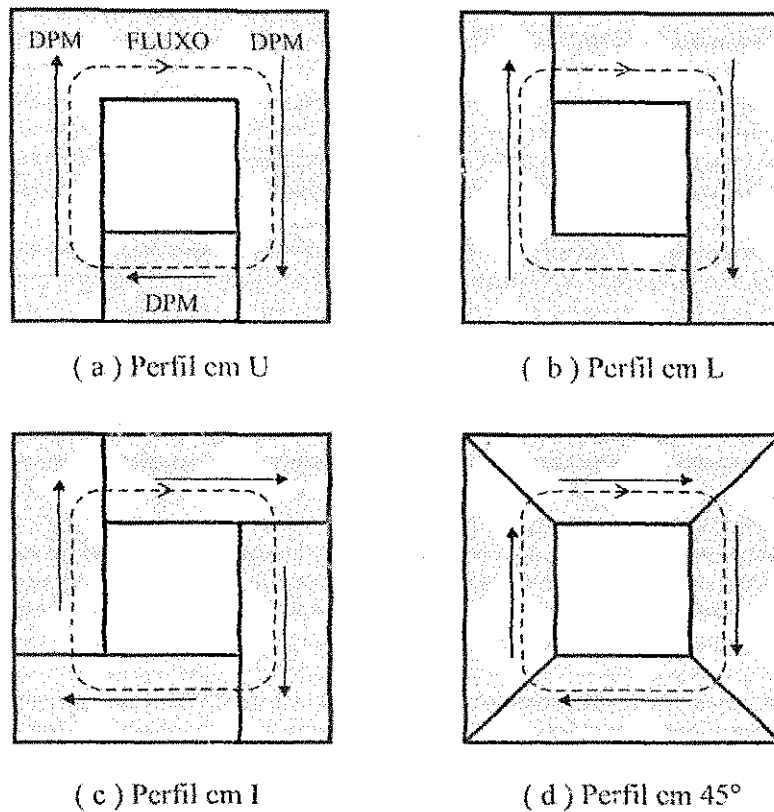


Figura 22: Diferentes formas de perfis de lâminas.[2]

2.13 A caracterização do transformador

Ao se analisar dispositivos em engenharia elétrica, é usual representar o dispositivo através de um circuito equivalente apropriado. Desta forma, a análise em profundidade e o projeto, bem como a precisão dos cálculos, é facilitada pela aplicação da teoria de circuitos elétricos. Na figura 23 é mostrado o circuito equivalente do transformador.

O circuito equivalente exato do transformador tem um total de seis parâmetros, como mostra a figura 23. Conhecendo-se tais parâmetros é possível calcular o desempenho do transformador sob todas as condições de operação. Referindo esses parâmetros a um dos lados do transformador, é possível colocar o circuito equivalente agora sem a relação de transformação, tal como mostrado na fig. 24.

Um método simples de se determinar experimentalmente os parâmetros do transformador são os ensaios de circuito aberto e curto-circuito, que serão apresentados a seguir.

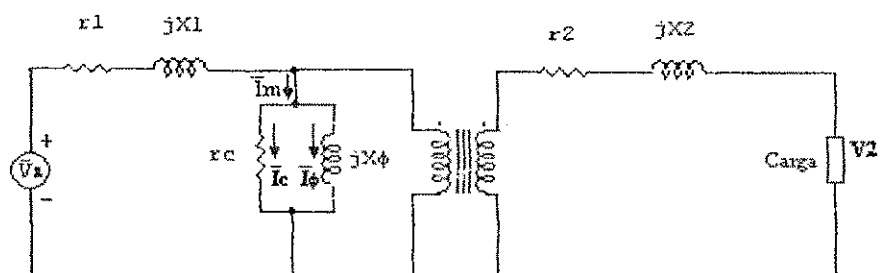


Figura 23: Circuito equivalente do transformador [3]

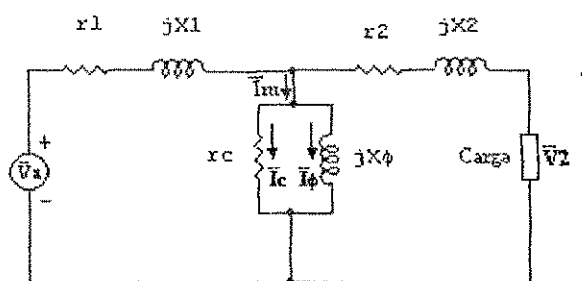


Figura 24: Circuito equivalente do transformador referido a um dos lados.

2.13.1 Teste de circuito aberto

Consiste em aplicar uma tensão conhecida num dos enrolamentos com o outro enrolamento em aberto, e assim, medir potência ativa, tensão e corrente no lado do transformador energizado. Por conveniência, costuma-se energizar o lado de baixa do transformado sob ensaio, de modo a se precisar de uma tensão menor para a realização do experimento.

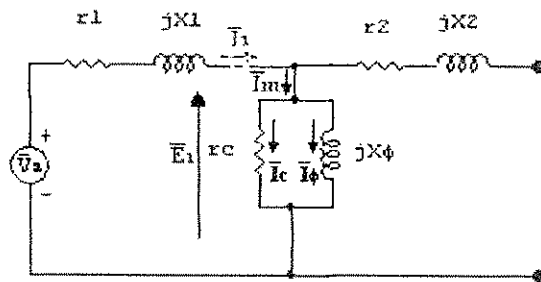


Figura 25: Circuito equivalente para o ensaio de circuito aberto.

Da figura 25 é possível perceber que neste ensaio, toda a corrente circulando no enrolamento energizado passa pelo núcleo, ou seja, esse ensaio mede as perdas no núcleo do transformador.

Fazendo:

P = Leitura do wattímetro

I_m = Leitura do amperímetro

V_L = Leitura do voltímetro

E desprezando-se as perdas dos instrumentos, a leitura do wattímetro pode ser tomada como sendo exatamente igual às perdas no núcleo do transformador. Isso porque as perdas oriundas do cobre neste caso, como a corrente circulante é demasiadamente pequena, são desprezíveis. Além disso, como I_m é muito pequena, a queda na impedância de dispersão do primário pode ser desprezada, de forma que, para fins práticos, a fem induzida será igual à tensão aplicada, isto é, $E_1 = V_L$. O ângulo do fator de potência em vazio,

Dos ensaios de circuito aberto, obtemos:

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{P}{V_L I_m} \quad (2.48)$$

Temos então que

$$I_c = I_m \cos \theta_0 \quad (2.49)$$

e,

$$I_\phi = I_m \sin \theta_0 \quad (2.50)$$

Lembrando que aqui, as correntes são referidas ao lado de baixa. Os valores correspondentes ao lado de alta seria menores pelo fator $1/a$, onde a é a relação entre as espiras do primário e do secundário, $N1/N2$. O resistor de perda no núcleo é calculado por:

$$4r_{cl} = \frac{P}{I_c^2} = \frac{P}{(I_m \cos \theta_0)^2} \quad (2.51)$$

)

Pelo lado de alta,

$$r_{cl1} = a^2 r_{cl} \quad (2.52)$$

A reatância de magnetização é obtida por:

$$x_{\mu} = \frac{V_L}{I_m \sin \theta_0} \quad (2.53)$$

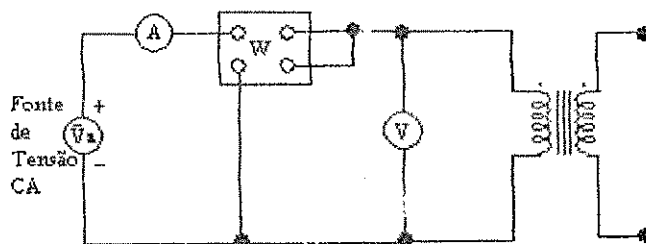


Figura 26: Diagrama de fiação para o teste de circuito aberto do transformador

2.13.2 Teste de curto-circuito

Para obter os outros dois parâmetros do circuito equivalente exato, ou seja, as reatâncias de dispersão do primário e do secundário, x_1 e x_2 , emprega-se o teste de curto-circuito, que consiste em aplicar uma pequena tensão num dos enrolamentos com o outro enrolamento curto-circuitado.

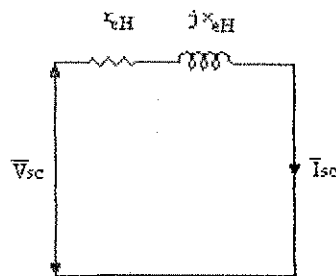


Figura 27: Circuito equivalente para o transformador em ensaio de curto-circuito.

A leitura do wattímetro pode ser considerada como sendo igual à perda no cobre, uma vez que a reduzida tensão aplicada nos terminais do transformador produz uma perda desprezível no circuito magnético do mesmo.

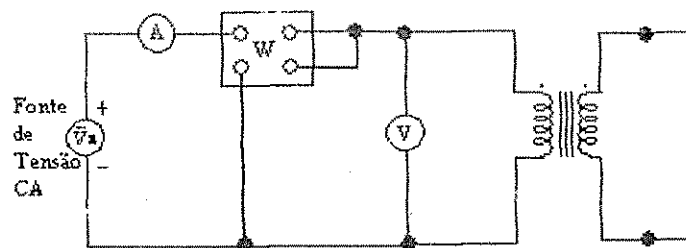


Figura 28: Diagrama de fiação para teste de circuito aberto.

$$R_{eff} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (2.54)$$

$$Z_{eff} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (2.55)$$

$$X_{eff} = \sqrt{Z_{eff}^2 - R_{eff}^2} \quad (2.56)$$

3. MEDIÇÕES

3.1 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Material utilizado:

02 – Multímetros digitais HP 973 A *TRUE RMS*;

01 – Autotransformador monofásico variável, 0-250 V, 5 A;

01 – Módulo de madeira e fórmica para montagem;

01 – Osciloscópio de memória digita HP 54503A;

01 – Transformador monofásico 800 VA, 127 / 220 / 380 V, núcleo de grãos orientados;

01 – Transformador monofásico 1 kVA, 110 V / 220 V, núcleo de grãos não-orientados;

1 – Sensor de corrente a efeito hall (LEM).

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Montou-se o circuito descrito no diagrama da figura 29. Energizou-se o lado de alta enquanto o lado de baixa foi curto-circuitado, tendo em vista uma menor corrente exigida do autotransformador. Calculou-se a corrente que seria a nominal do enrolamento energizado e a tensão aplicada foi gradualmente incrementada até atingir a corrente nominal outrora calculada. O amperímetro e o voltímetro mediam respectivamente, corrente e tensão RMS, enquanto que o osciloscópio media as perda no transformador ensaiado.

Isso foi possível porque o osciloscópio utilizado permitia o processamento de operações matemáticas com os sinais obtidos em seus canais. A potência ativa dissipada pelo transformador foi então medida fazendo-se o produto da leitura no canal que media a tensão pela leitura do canal que recebia dados do sensor de corrente, fazendo em seguida seu valor médio e multiplicando pelo fator inverso do sensor de corrente. Assim procedendo para cada transformador, foram obtidos os dados das tabelas 2 e 3.

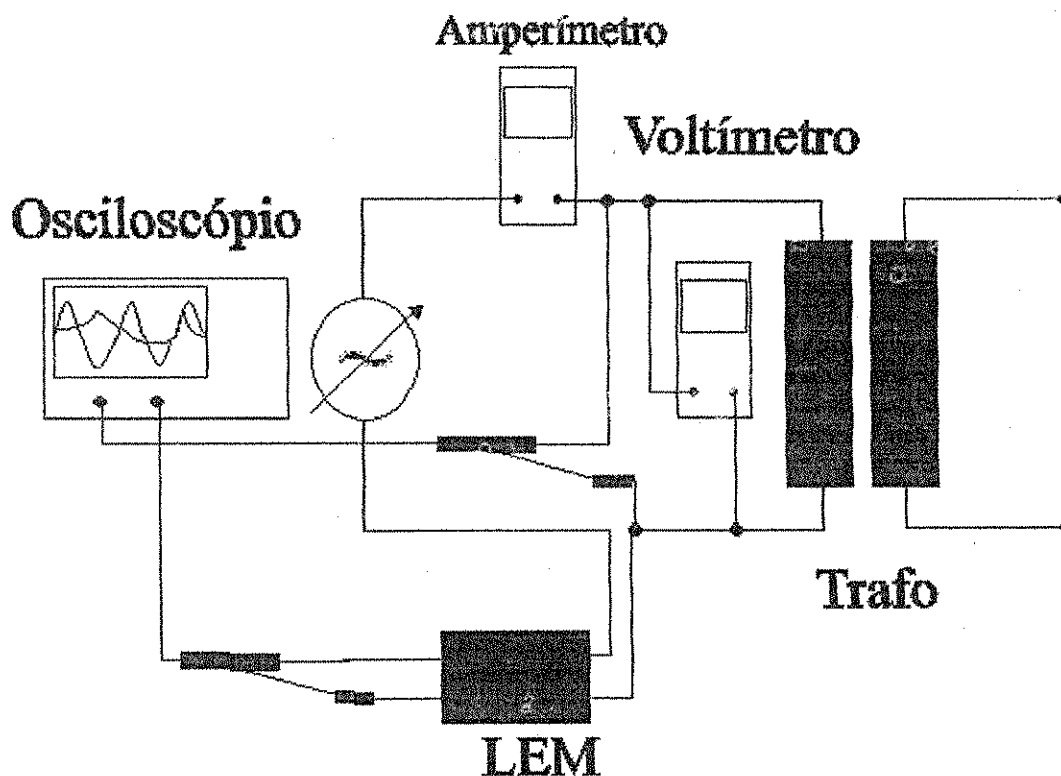


Figura 29: Diagrama de montagem para ensaio de curto-circuito

Tabela 2: Dados coletados para ensaio de curto-circuito no transformador GO

I primário (em p.u.)	Potência (W)	Osciloscópio (V)	Voltímetro (V)	Osciloscópio (A)	Amperímetro (A)
0,25	1,212	2,4	2,4	0,9494	0,92
0,5	4,646	4,63	4,7	1,7776	1,8

0,75	10,3828	6,9	7,04	2,6462	2,7
1	21,614	9,42	9,5	3,6158	3,64

Tabela 3: Dados coletados para ensaio de curto-circuito no transformador de núcleo GNO

I primário (em p.u.)	Potência (W)	Osciloscópio (V)	Voltímetro (V)	Osciloscópio (A)	Amperímetro (A)
0,25	5,454	2,175	2,185	1,11706	1,12
0,5	12,5846	4,34	4,36	2,222	2,22
0,75	27,068	6,7	6,8	3,3936	3,43
1	45,248	9,1	9,13	4,545	4,58

O ensaio de curto-circuito não foi realizado no transformador de núcleo toroidal devido aos baixos valores de reatância de dispersão apresentados por este.

3.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

Material utilizado:

- 02 – Multímetros digitais HP 973 A *TRUE RMS*;
- 01 – Autotransformador monofásico variável, 0-250 V, 5 A;
- 01 – Módulo de madeira e fórmica para montagem;
- 01 – Osciloscópio de memória digita HP 54503A;

01 – Transformador monofásico 800 VA, 127 / 220 / 380 V, núcleo de grãos orientados;

01 – Transformador monofásico 1 kVA, 110 V / 220 V, núcleo de grãos não-orientados;

01 – Transformador monofásico 23 V / 23 V, núcleo toroidal;

01 – Sensor de corrente a efeito hall (LEM).

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Montou-se o circuito descrito no diagrama da figura 30. Energizou-se o lado de baixa enquanto o lado de alta ficou aberto, tendo em vista uma menor tensão exigida do autotransformador. A tensão aplicada foi gradualmente incrementada. O amperímetro e o voltímetro mediam respectivamente, corrente e tensão RMS, enquanto que o osciloscópio media as perdas no transformador ensaiado.

Novamente, o artifício da medição das perdas no transformador ensaiado foi o descrito no procedimento experimental para o ensaio de curto-circuito.

Assim cada transformador, foram obtidos os dados das tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4: Dados coletados para ensaio de circuito aberto no transformador toroidal.

Tensão aplicada (em p.u.)	Potência (W)	Osciloscópio (V)	Voltímetro (V)	Osciloscópio (A)	Amperímetro (A)
0,1	0,045361	2,37	2,37	0,030515	0,02
0,2	0,158763	4,5	4,6	0,048041	0,04

0,5	0,910309	11,2	11,52	0,095052	0,1
0,75	1,907216	16,9	17,2	0,140206	0,14
1	3,360825	22,58	23,02	0,237113	0,25
1,1	3,763918	25	25,5	0,376289	0,37
1,13	4,595876	25,53	26	0,4	0,4

Tabela 5: Dados coletados para ensaio de circuito aberto no transformador GNO

Tensão aplicada (em p.u.)	Potência (W)	Osciloscópio (V)	Voltímetro (V)	Osciloscópio (A)	Amperímetro (A)
0,1	0,2525	11,02	11,1	0,067246	0,0558
0,2	1,4645	27,2	27,8	0,09898	0,09
0,5	5,1712	54,76	55,4	0,14544	0,14
0,75	11,1302	81,3	82,4	0,18786	0,18
1	18,988	108,8	110,4	0,25452	0,26
1,1	22,6644	120,8	121,5	0,301586	0,30

Tabela 3.4 - Dados coletados para ensaio de circuito aberto no transformador de núcleo G.N.O.

Tabela 6: Dados coletados para ensaio de circuito aberto no transformador GO

Tensão aplicada (em p.u.)	Potência (W)	Osciloscópio (V)	Voltímetro (V)	Osciloscópio (A)	Amperímetro (A)
0,1	0,16766	12,6	12,76	0,03434	0,01967
0,2	0,9292	31,29	31,75	0,04848	0,03895

0,5	3,636	68,8	68,4	0,08484	0,0822
0,75	6,7872	93,8	95,5	0,19998	0,193
1	12,524	124,8	126,5	0,7878	0,8
1,1	15,3924	138,7	140	1,22816	1,19

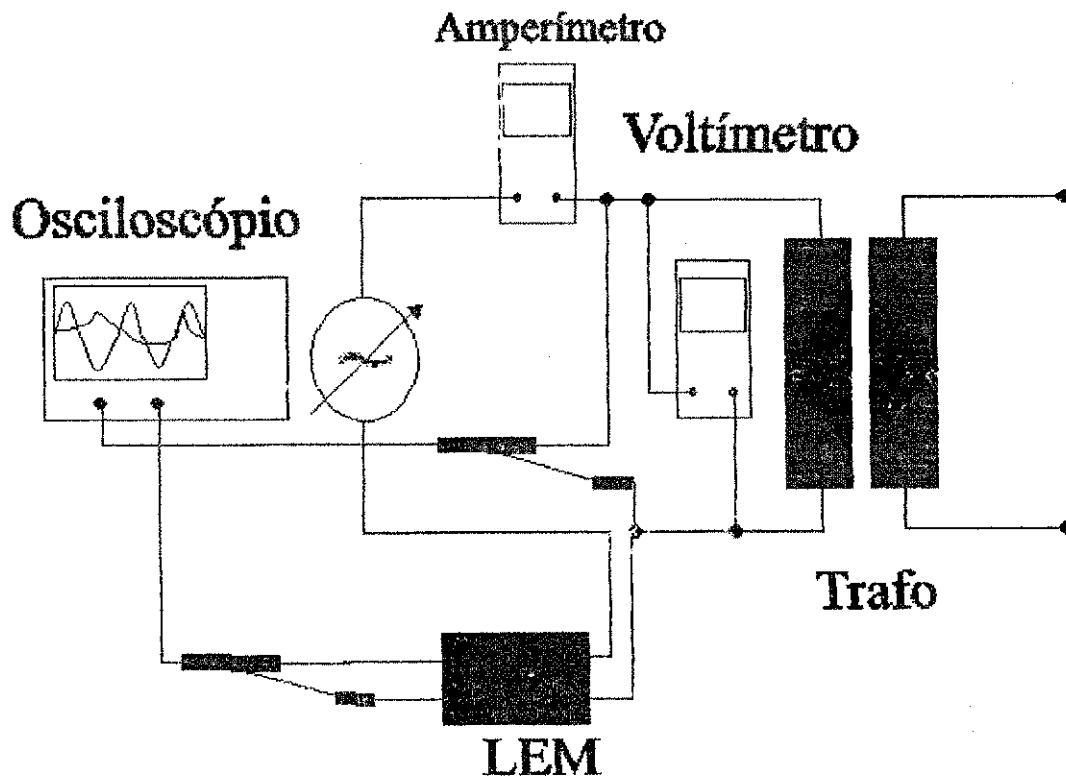


Figura 30: Diagrama de montagem para ensaio de circuito aberto.

PARÂMETROS CALCULADOS

Transformador G.O.

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{12,524}{126,5 * 0,8} = \cos^{-1} 0,1237 = 1,447 \text{rad}$$

$$I_c = I_m \cos \theta_0 = 98,96 \text{ mA}$$

$$I_\phi = I_m \sin \theta_0 = 793,88 \text{ mA}$$

$$r_{cl} = \frac{P}{(I_m \cos \theta_0)^2} = \frac{12,524}{(98,96 * 10^{-3})^2} = 1278,86 \Omega$$

$$x_{gl} = \frac{V_L}{I_\phi} = \frac{126,5}{793,88 * 10^{-3}} = 159,34 \Omega$$

$$R_{eff} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{21,614}{3,64^2} = 1,63 \Omega$$

$$Z_{eff} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{9,5}{3,64} = 2,61 \Omega$$

$$X_{eff} = \sqrt{Z_{eff}^2 - R_{eff}^2} = \sqrt{2,61^2 - 1,63^2} = 2,04 \Omega$$

Transformador G.N.O.

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{18,99}{110,4 * 0,26} = \cos^{-1} 0,6616 = 0,3479 \text{ rad}$$

$$I_c = I_m \cos \theta_0 = 0,26 * 0,6616$$

$$I_c = 172 \text{ mA}$$

$$I_\phi = I_m \sin \theta_0 = 194,97 \text{ mA}$$

$$r_{cl} = \frac{18,99}{(172 * 10^{-3})^2} = 641,90 \Omega$$

$$x_{\phi L} = \frac{V_L}{I_\phi} = \frac{110,4}{194,97 * 10^{-3}} = 566,24 \Omega$$

$$R_{eff} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{45,248}{4,58^2} = 2,16 \Omega$$

$$Z_{eff} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{9,13}{4,58} = 1,99 \Omega$$

$$X_{eff} = \sqrt{R_{eff}^2 - Z_{eff}^2} = \sqrt{2,16^2 - 1,99^2} = 0,84 \Omega$$

Transformador toroidal

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{3,361}{23,02 * 0,25} = \cos^{-1} 0,584 = 0,947 \text{ rad}$$

$$I_c = 0,25 * 0,584 = 146 \text{ mA}$$

$$I_\phi = 0,25 * \sin 0,947 = 202,92 \text{ mA}$$

$$r_{cl} = \frac{3,361}{(146 * 10^{-3})^2} = 157,67 \Omega$$

$$x_{\phi L} = \frac{V_L}{I_\phi} = \frac{23,02}{202,92 * 10^{-3}} = 113,44 \Omega$$

Resistência dos enrolamentos medidos diretamente com ohmímetro:

$$R_H=R_L=0,3 \Omega$$

Reatância de dispersão: desprezível

3.3 Levantamento da curva de magnetização inicial

Material utilizado:

02 – Multímetros digitais HP 973 A *TRUE RMS*;

01 – Autotransformador monofásico variável, 0-250 V, 5 A;

01 – Módulo de madeira e fórmica para montagem;

01 – Osciloscópio de memória digital HP 54503A;

01 – Transformador monofásico 800 VA, 127 / 220 / 380 V, núcleo de grãos orientados;

01 – Transformador monofásico 1 kVA, 110 V / 220 V, núcleo de grãos não-orientados;

01 – Transformador monofásico 23 V / 23 V, núcleo toroidal;

01 – Resistor 2.1 Ω .

Procedimento Experimental

O procedimento realizado para levantar a curva de magnetização inicial dos transformadores utilizados neste trabalho foi o de inicialmente desmagnetizar o núcleo dos

mesmos, levando-os à saturação e em seguida, lentamente decrescer até zero a tensão aplicada ao lado de baixa, com o lado de alta em aberto.

Em seguida, monotonicamente eleva-se a tensão sobre o enrolamento de baixa até esta chegar à saturação.

O integrador RC indicado apresenta $R_2 \gg 1/(2\pi fC)$, de tal sorte que praticamente toda a tensão u_2 está sobre R_2 . A tensão aplicada ao osciloscópio u_y será:

$$u_y = \frac{1}{C} \int i_2 dt \cong \frac{1}{C} \int \frac{u_2}{R_2} dt = \frac{1}{R_2 C} \int u_2 dt \quad (3.1)$$

Como $u_2 = N_2 S' dB/dt$, tem-se:

$$u_y = \frac{1}{R_2 C} \int (N_2 S' \frac{dB}{dt}) dt = \frac{N_2 S'}{R_2 C} B \quad (3.2)$$

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S'} u_y \quad (3.3)$$

Aplicando-se a lei circuital de Ampère ao longo do caminho médio do fluxo, de comprimento l , obtém-se $H = N_1 i_1 / l$. O sinal de corrente primária é obtido do *shunt*, que doravante passaremos a denominar R_1 . Assim, $i_1 = u_x / R_1$.

$$H = \frac{N_1}{R_1 l} u_x \quad (3.4)$$

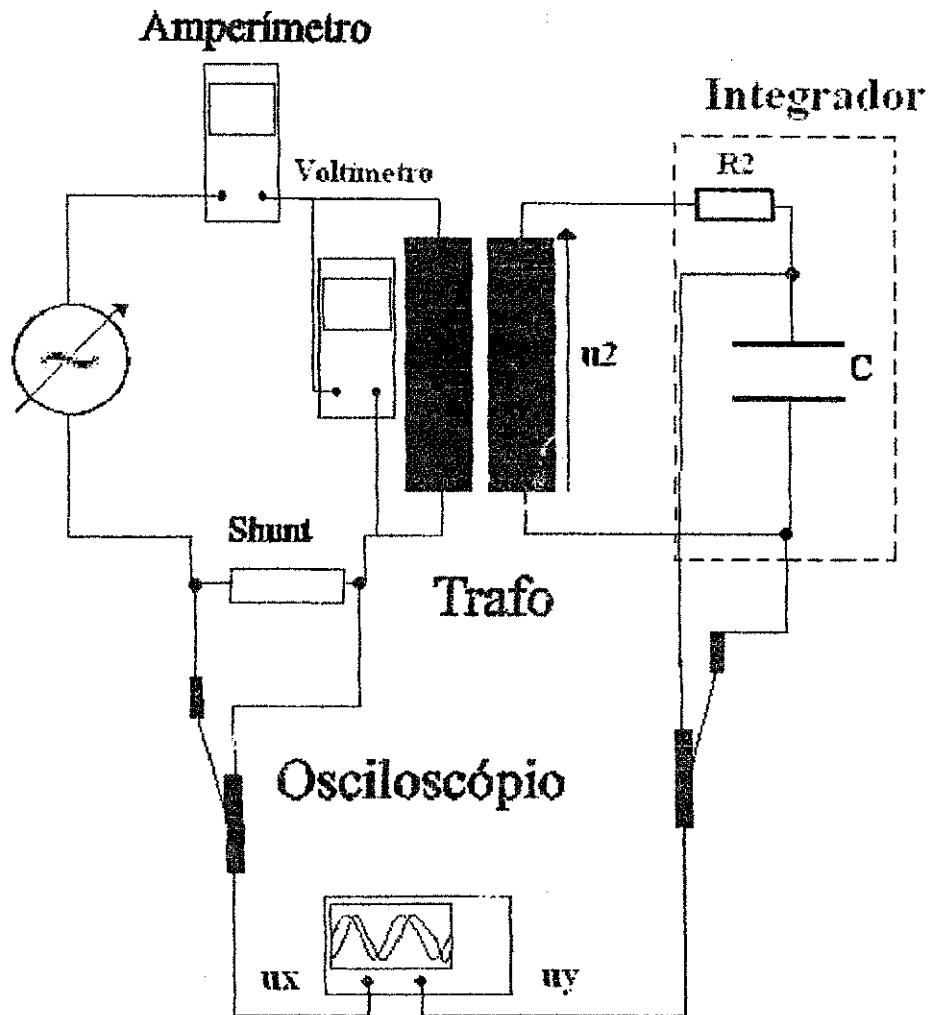


Figura 31: Diagrama de montagem para levantamento do laço de magnetização inicial.

Dados coletados

Com o osciloscópio foi obtido um sinal proporcional ao fluxo concatenado no secundário, que no presente caso, foi o lado de alta. Ainda com o osciloscópio, foi obtido um sinal proporcional à corrente de pico, porém no primário. Foi então necessário referir todas as grandezas a um dos lados do transformador. O lado escolhido foi o de baixa. Para transformar o fluxo concatenado no secundário para fluxo concatenado no primário usou-se:

$$\phi_1 = \phi_2 \quad (3.5)$$

$$\frac{\lambda_1}{N_1} = \frac{\lambda_2}{N_2} \quad (3.6)$$

$$\lambda_1 = \frac{N_1}{N_2} \lambda_2 \quad (3.7)$$

Para obter então a curva de magnetização inicial em termos de B-H, utilizou-se as equações 2.18 e 2.19, onde tivemos:

3.3.1 Transformador G.N.O. 1 kVA

$$S' = 38.5 \text{ cm}^2$$

$$l = 47.5 \text{ cm}$$

$$N = 135$$

O processo de obtenção do número de espiras do transformador G.N.O. está descrito no anexo deste trabalho, uma vez que este não foi fornecido pelo fabricante. O caminho médio foi obtido por medição direta com paquímetro de precisão e a seção magnética S' foi fornecido pelo fabricante e encontra-se nos dados do transformador em anexo.

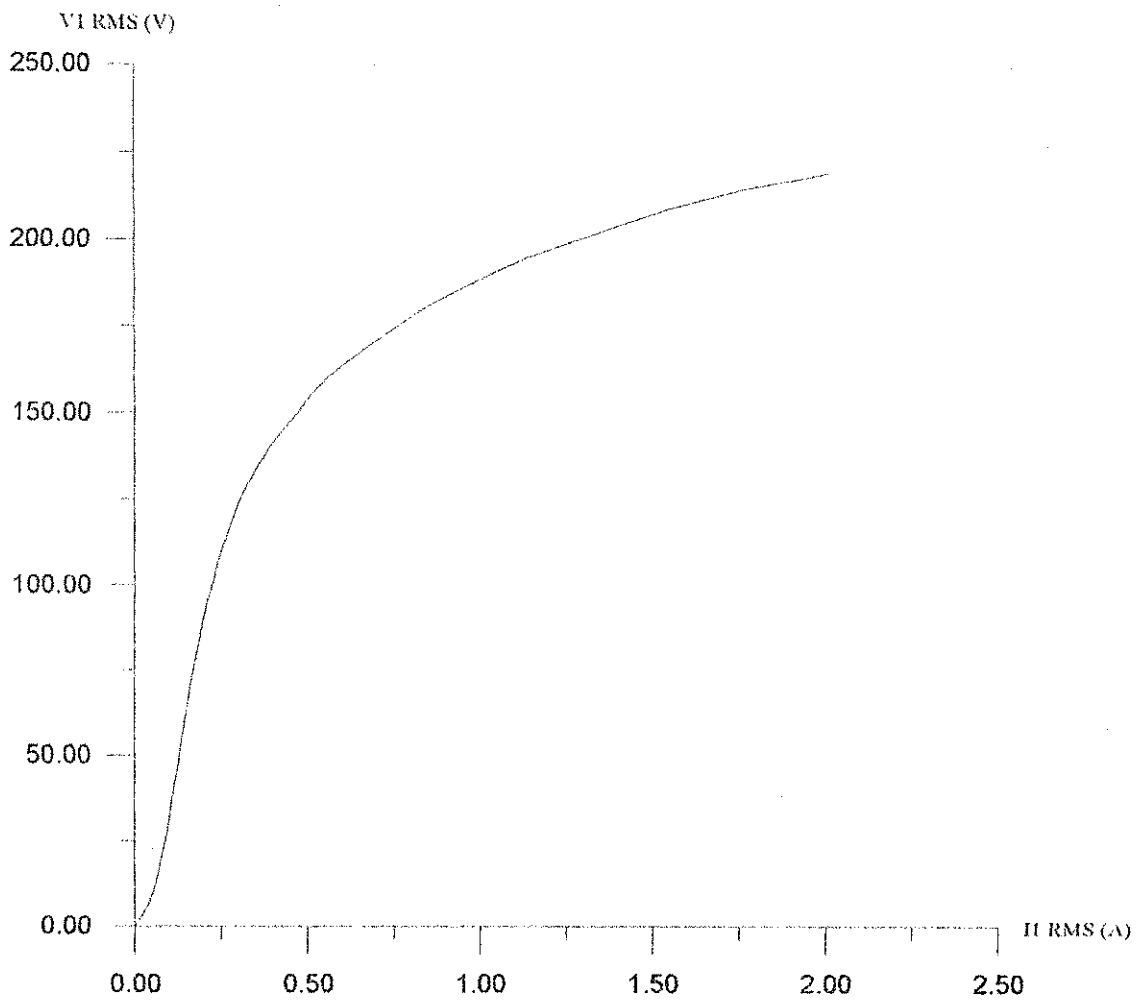


Figura 32: Curva tensão corrente de magnetização inicial do transformador GNO

Tabela 7: Tensão e corrente primária de magnetização inicial medidas no transformador GNO

V_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)
0	0
6.31	0.03879
10.15	0.0526
15.1	0.0663
22.5	0.0826
24.88	0.0871
30.13	0.0967

40.4	0.1131
50.3	0.1292
60.1	0.1443
70.7	0.1625
79.9	0.179
85.6	0.1902
91	0.202
95	0.21
100.2	0.2246
106.5	0.2418
110.2	0.2525
115.2	0.2689
120	0.2865
125	0.307
129.7	0.3284
135	0.358
139.8	0.39
145.2	0.43
150	0.47
155.3	0.51
160.2	0.56
165	0.62
170.3	0.69
175.7	0.77
180.3	0.84

185.4	0.93
190.2	1.03
195.2	1.14
200.3	1.28
205.8	1.43
209.5	1.54
215	1.75
220.3	2.01

Tabela 8: Fluxo concatenado e corrente de pico para transformador GNO em magnetização inicial

λ_1 (Wb esp)	I_1 (A)
0	0
0.0250445	8.272727E-2
3.892786E-2	9.613637E-2
0.0569853	0.1102273
0.0853872	0.1240909
9.346315E-2	0.1293182
0.1134261	0.1377273
0.1497225	0.1597727
0.1878337	0.1768182
0.2259449	0.2002273
0.2667783	0.2225
0.3003525	0.2477273
0.3212228	0.2681818

0.3411858	0.2863636
0.3611489	0.3
0.3802044	0.325
0.4037971	0.3545454
0.4228527	0.375
0.4419083	0.4090909
0.4564269	0.4386364
0.4782046	0.4772727
0.4990751	0.5295454
0.516316	0.5795454
0.5380935	0.6386364
0.560779	0.7136364
0.5780195	0.8045455
0.600705	0.9
0.620668	1
0.640631	1.106818
0.660594	1.245455
0.683279	1.420455
0.709594	1.568182
0.726835	1.745455
0.7522425	1.990909
0.77402	2.154545
0.7903535	2.438636
0.820298	2.784091
0.8375385	3.081818

0.862946	3.55
0.8883535	4.136364

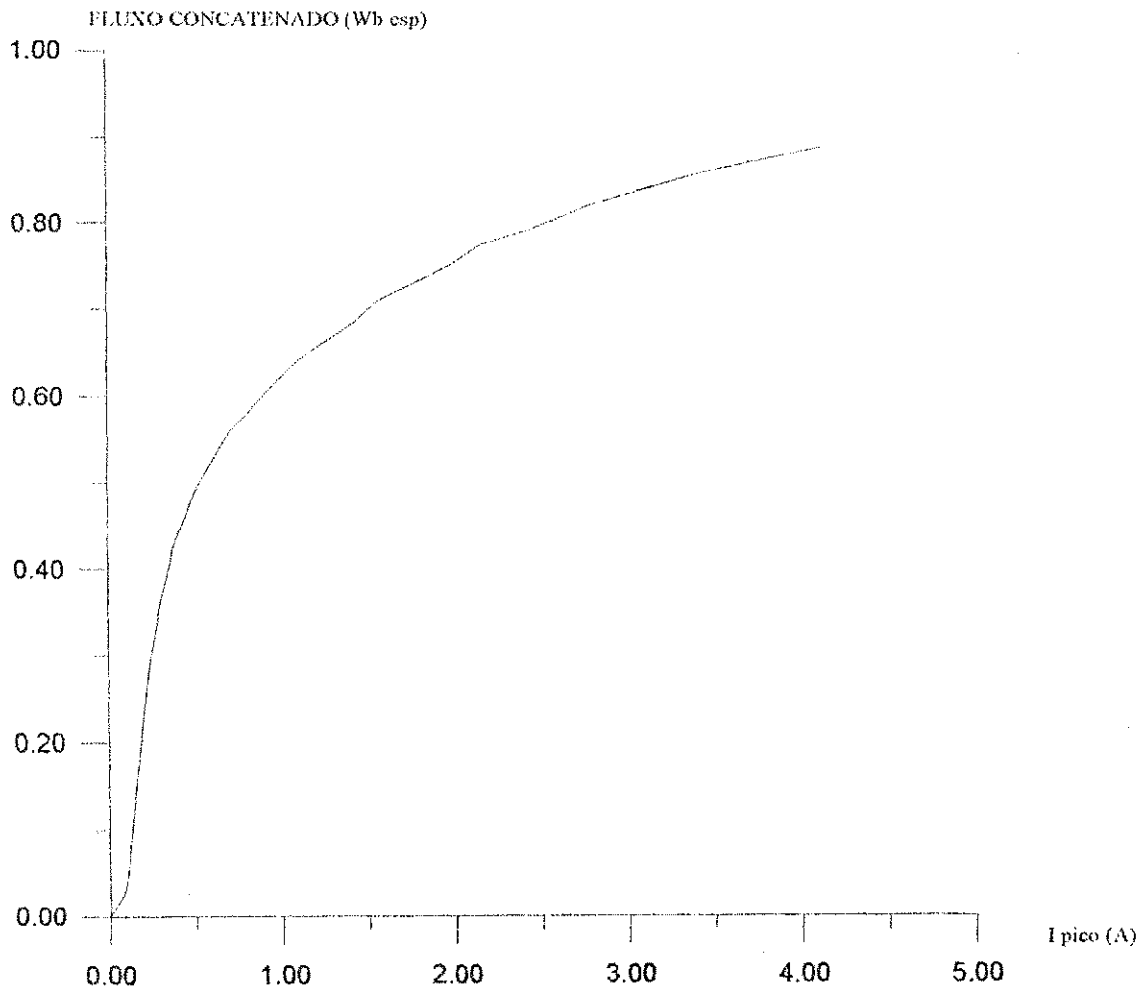


Figura 33: Fluxo concatenado no primário versus corrente de pico circulante no primário do transformador GNO em magnetização inicial

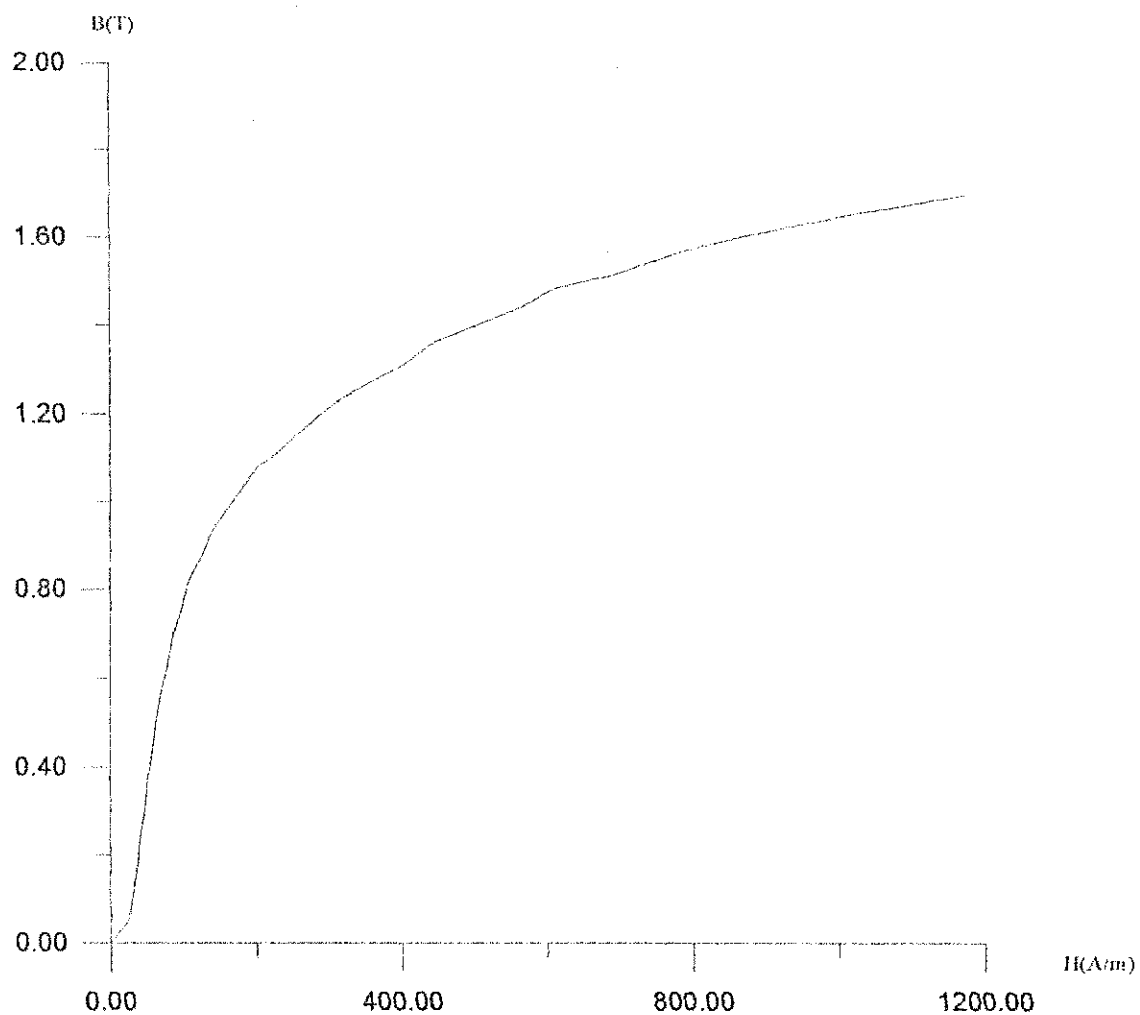


Figura 34: Indução magnética versus Campo magnético em magnetização inicial no transformador GNO

Tabela 9: Indução magnética e Campo magnético no transformador GNO em magnetização inicial

B (T)	H(A/m)
0	0
4.818567E-2	23.51196
7.489728E-2	27.32297
0.1096398	31.32775
0.1642851	35.26794
0.1798233	36.75359
0.218232	39.14354

0.2880664	45.40909
0.3613924	50.25359
0.4347184	56.90668
0.5132819	63.23682
0.5778788	70.40668
0.6180333	76.22009
0.6564422	81.38754
0.6948512	85.26314
0.731514	92.36841
0.7769064	100.7655
0.8135694	106.5789
0.8502324	116.268
0.8781662	124.6651
0.9200666	135.646
0.9602215	150.5024
0.9933929	164.7129
1.035293	181.5072
1.07894	202.823
1.112111	228.6603
1.155758	255.7895
1.194166	284.2105
1.232575	314.5694
1.270984	353.9713
1.31463	403.7081
1.36526	445.6938

1.398432	496.0764
1.447316	565.8373
1.489216	612.3445
1.520642	693.0859
1.578255	791.2677
1.611426	875.885
1.66031	1008.947
1.709194	1175.598

3.3.2 Transformador G.O.

O procedimento experimental para a obtenção do transformador G.O. foi idêntico ao do transformador G.N.O.. Os resultados obtidos foram:

Tabela 10: Tensão e corrente primária de magnetização inicial medidas no transformador GO

I_{RMS} (A)	V_{RMS} (V)
0	0
0.00878	4.24
0.01579	9.25
0.02236	14.83
0.02793	19.98
0.03256	24.6
0.0381	30.23
0.0474	39.5

0.0583	49.6
0.0711	59.9
0.0874	70
0.1113	80.5
0.1538	90.1
0.2491	99.8
0.343	105
0.46	110.4
0.53	115
0.65	120
0.78	125.5
0.81	127
0.88	129.5
1.03	134.8
1.18	139.4
1.38	145.3
1.55	150
1.75	154.6
2.05	160.3
2.86	170
3.54	175.2

1

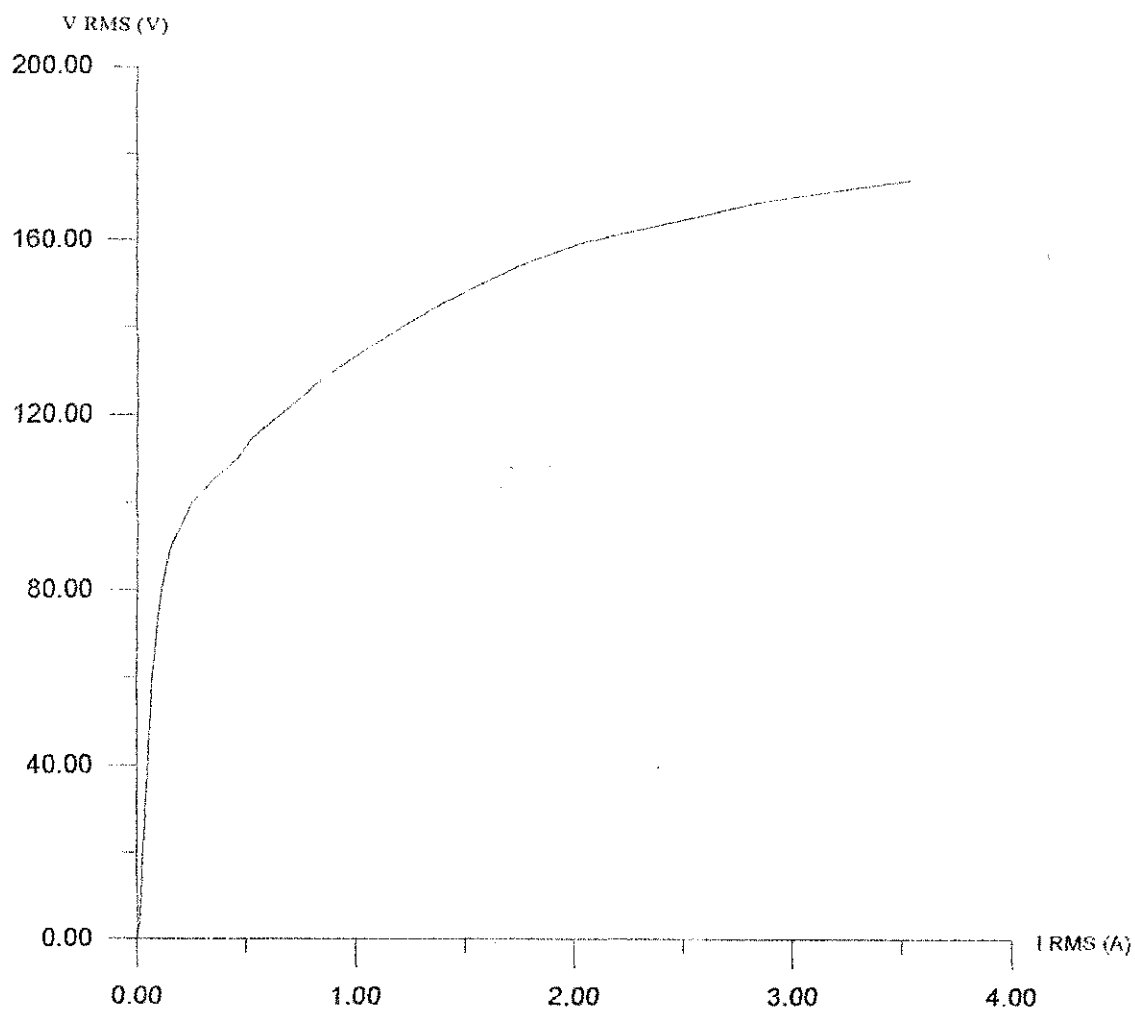


Figura 35: Curva tensão corrente de magnetização inicial do transformador GO

Em termos de fluxo concatenado e corrente no primário, temos:

Tabela 11: Fluxo concatenado e corrente de pico para transformador GO em magnetização inicial

λ (Wb esp)	I_{pico} (A)
0	0
1.836086E-2	2.227273E-2
3.735123E-2	2.954545E-2
5.802031E-2	3.704546E-2
7.638118E-2	4.318182E-2
9.390268E-2	4.772727E-2

0.1143619	5.636363E-2
0.1489853	6.590909E-2
0.185707	8.227272E-2
0.2276747	0.1047727
0.2643964	0.1347727
0.3042657	0.1840909
0.3409874	0.2863636
0.3766599	0.5318182
0.3965945	0.6886364
0.4249227	0.9318182
0.4343655	1.079545
0.4543001	1.290909
0.4794807	1.511364
0.486825	1.568182
0.4941694	1.704545
0.5130548	1.970455
0.5350879	2.247727
0.5550225	2.620455
0.5749572	2.970454
0.5896459	3.363636
0.6127281	4.047727
0.6484006	6.136364
0.6651877	7.670455

FLUXO CONCATENADO (Wb esp)

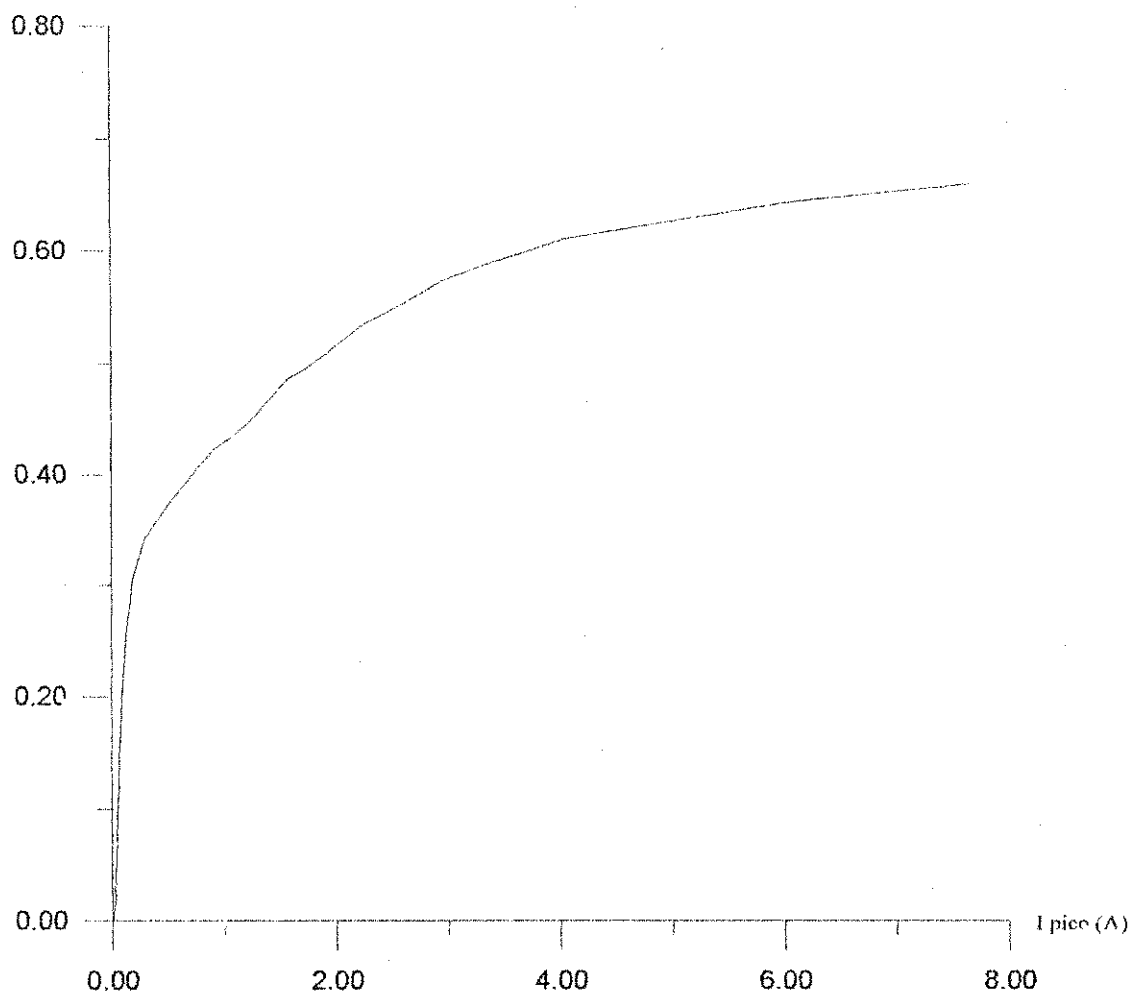


Figura 36: Fluxo concatenando no primário versus corrente de pico circulante no primário do transformador GO em magnetização inicial.

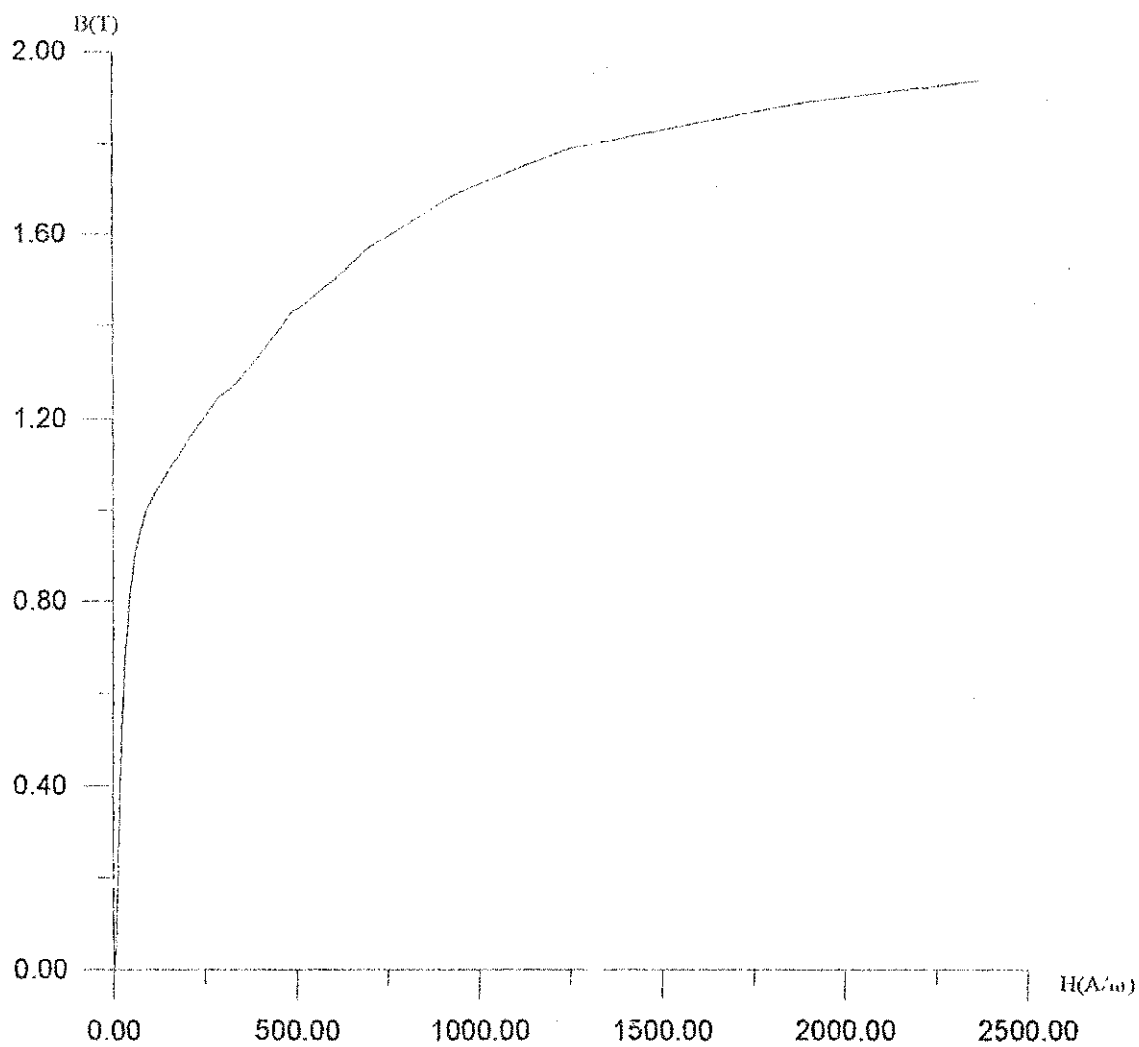


Figura 37: Indução magnética versus Campo magnético em magnetização inicial no transformador GO

Tabela 12: Indução magnética e Campo magnético no transformador GO em magnetização inicial

B (T)	H (A/m)
0	0
5.384543E-2	6.886554
0.109537	9.135222
0.1701515	11.45417
0.223997	13.35148
0.2753809	14.7569

0.33538	17.42719
0.4369173	20.37858
0.5446081	25.43808
0.6676834	32.3949
0.7753742	41.67067
0.8922957	56.91947
0.9999865	88.54139
1.1046	164.434
1.163061	212.921
1.246137	288.1109
1.273829	333.7869
1.33229	399.139
1.406135	467.3019
1.427673	484.8696
1.449211	527.032
1.504595	609.2493
1.569209	694.9796
1.62767	810.2242
1.686131	918.4412
1.729208	1040.01
1.796899	1251.526
1.901513	1897.316
1.950743	2371.645

3.3.3 Transformador toroidal

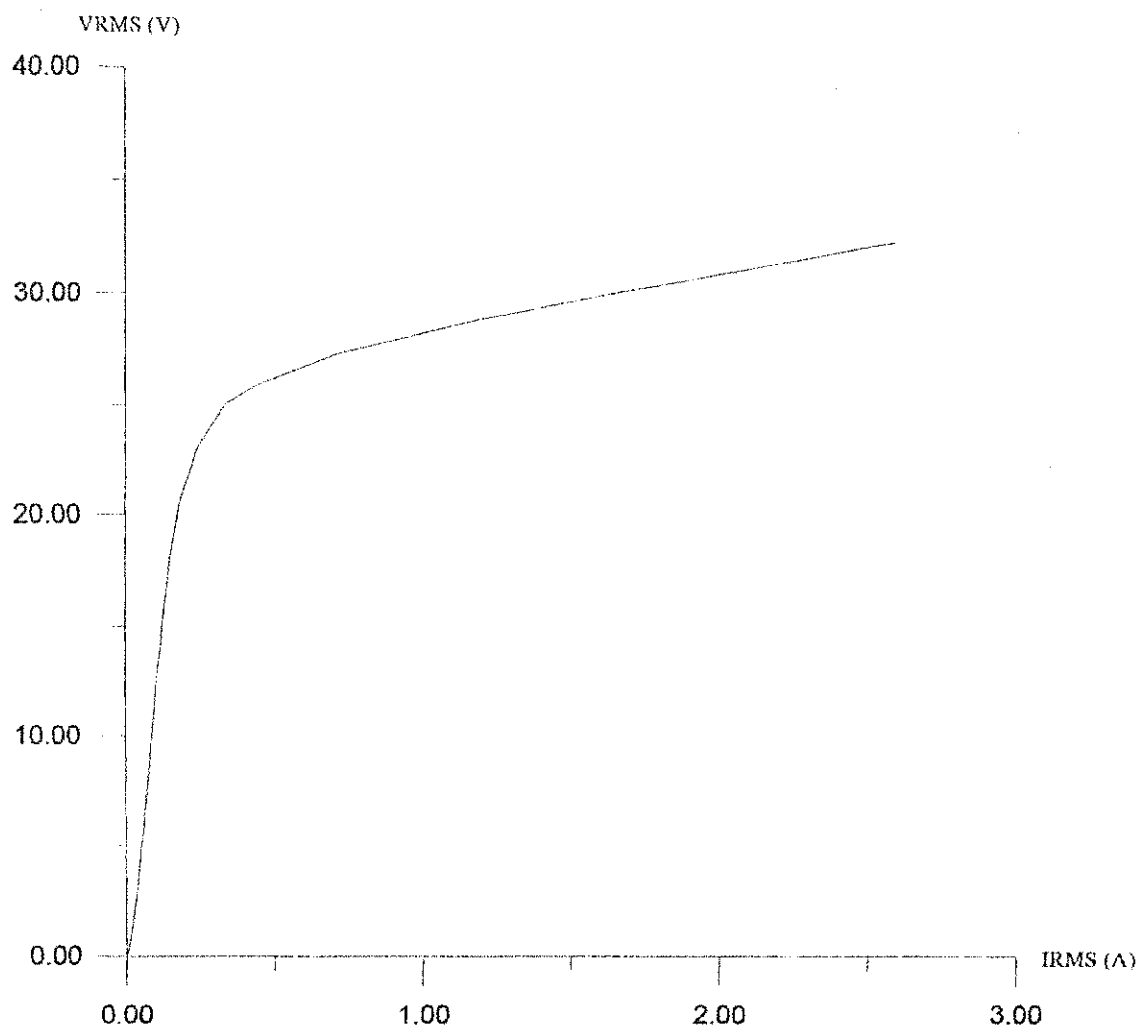


Figura 38: Curva tensão corrente de magnetização inicial do transformador Toroidal

Tabela 13: Tensão e corrente primária de magnetização inicial medidas no transformador Toroidal

VRMS (V)	IRMS (A)
0	0
1.12	0.01803
2.26	0.03
3	0.03668
4.06	0.045
5.86	0.0588

6.44	0.0629
7.09	0.0677
8.08	0.0744
10.17	0.0882
12.22	0.102
14.96	0.1218
15.93	0.1296
18	0.1493
19.17	0.1631
20.15	0.177
21.03	0.1925
22.76	0.2342
23.06	0.244
24	0.288
25.03	0.336
25.92	0.45
27.3	0.71
28.58	1.1
29.26	1.35
30.25	1.71
32.38	2.6

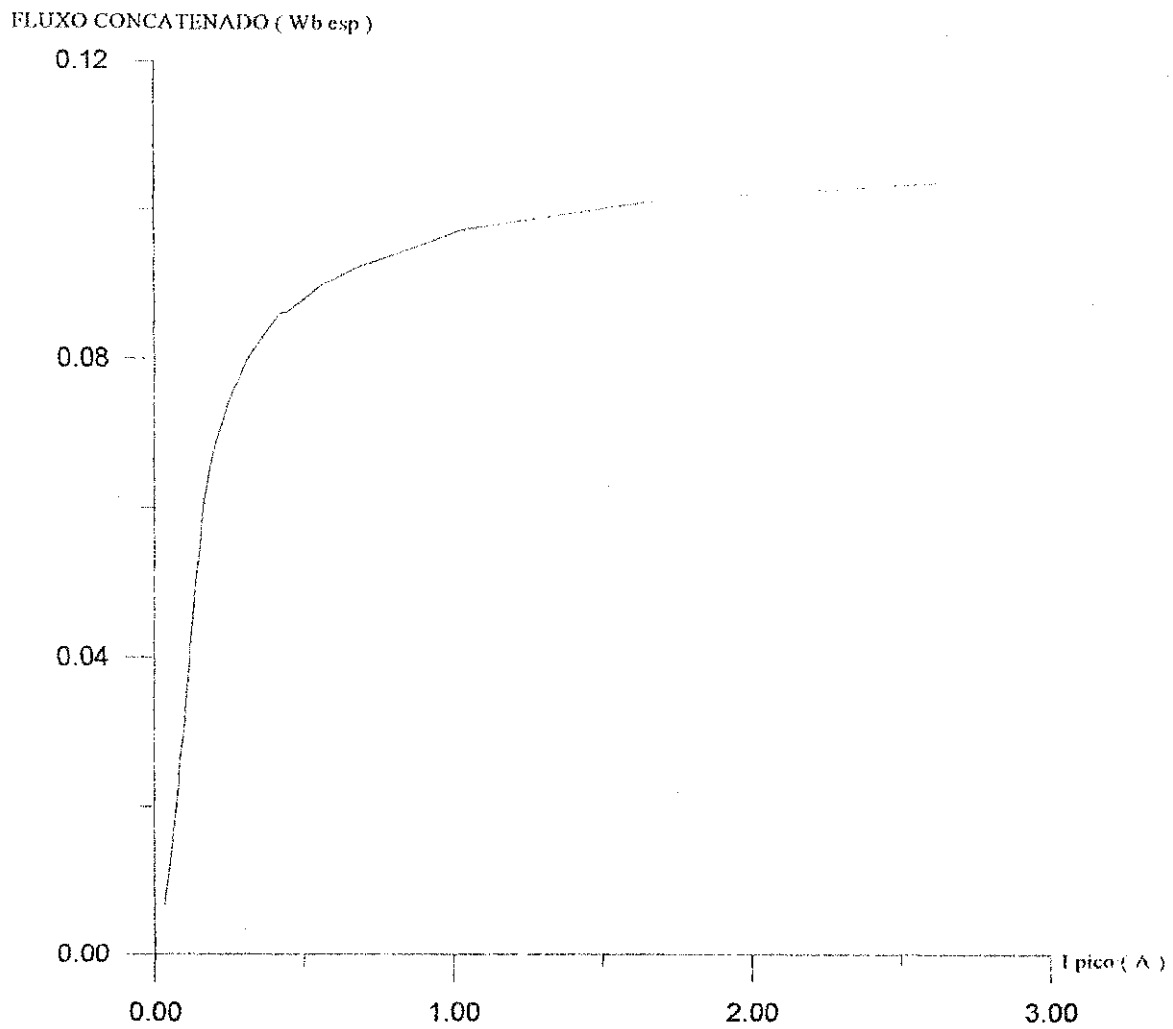


Figura 39: Fluxo concatenado no primário versus corrente de pico circulante no primário do transformador GO em magnetização inicial

Tabela 14: Fluxo concatenado e corrente de pico para transformador GO em magnetização inicial

FLUXO	IPICO
6.918996E-3	3.231818E-2
1.088891E-2	4.704545E-2
1.393781E-2	5.590909E-2
1.742226E-2	6.636363E-2
2.335672E-2	8.131819E-2
2.631487E-2	8.522727E-2
0.0290371	9.318182E-2

3.230377E-2	0.1018182
3.992601E-2	0.1170455
4.809269E-2	0.1334091
5.722123E-2	0.1568182
6.115939E-2	0.1647727
6.860014E-2	0.2045455
7.259274E-2	0.2363636
7.654905E-2	0.2727273
7.985201E-2	0.3090909
0.0860224	0.4204546
8.620388E-2	0.4431818
9.001499E-2	0.5681818
9.237427E-2	0.6840909
9.745575E-2	1.029546
0.1019928	1.731818
0.1043521	2.629545

Tabela 15: Indução magnética e Campo magnético no transformador Toroidal em magnetização inicial

B (T)	H (A/m)
0	0
0.1201215	4.937842
0.1890436	7.187999
0.2419759	8.54226
0.3024698	10.13959
0.4054986	12.50087

0.4568554	13.02174
0.5041163	14.2371
0.5608293	15.55664
0.6931599	17.88319
0.8349425	20.38336
0.9934241	23.96
1.061795	25.17536
1.190975	31.25218
1.260291	36.11361
1.328977	41.66957
1.38632	47.2255
1.493444	64.24058
1.496595	67.71304
1.56276	86.81158
1.60372	104.5211
1.69194	157.3027
1.770708	264.6017
1.811668	401.7639

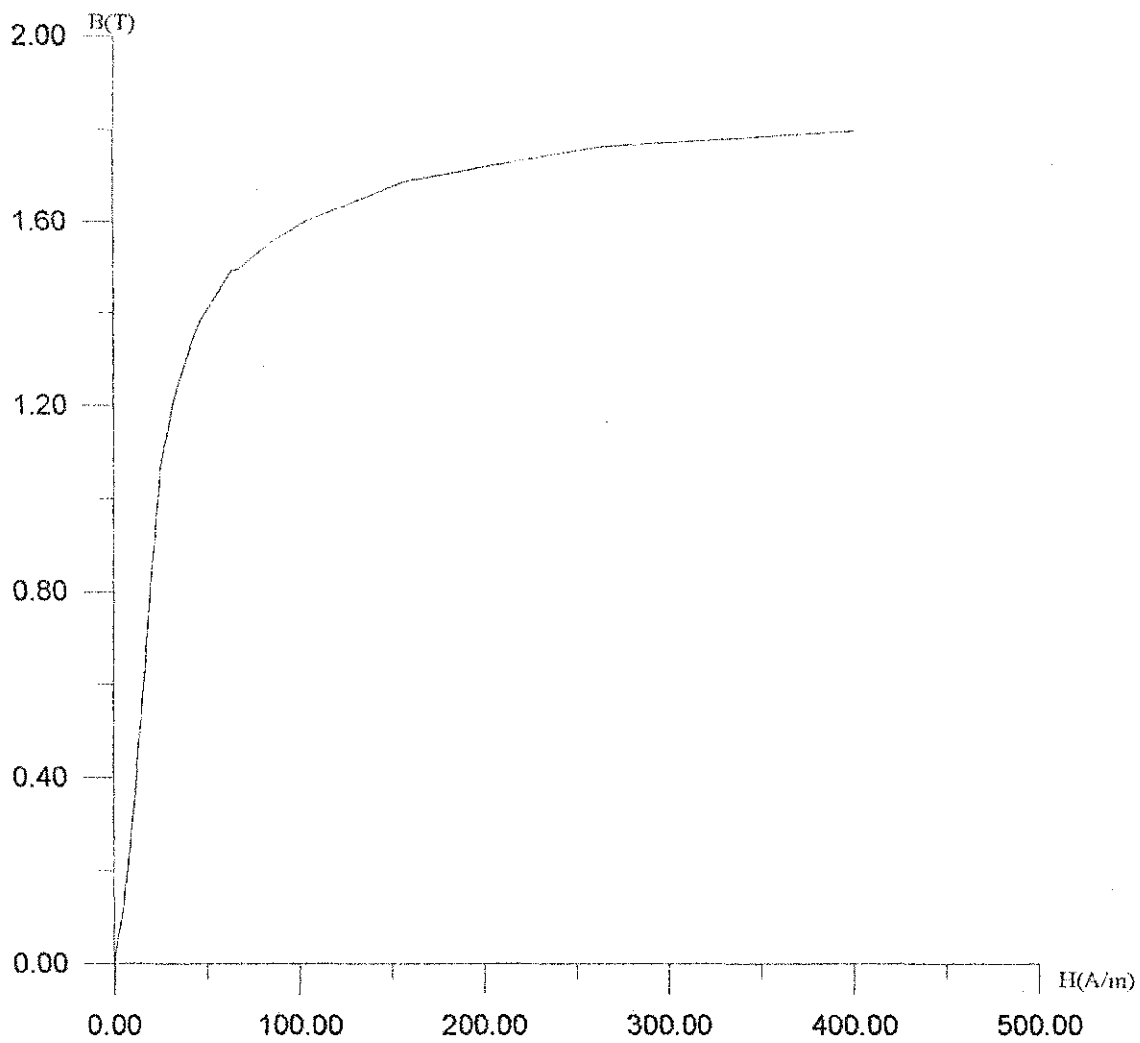


Figura 40: Indução magnética versus Campo magnético em magnetização inicial no transformador Toroidal

Tendo em vista que $N = 60$ espiras tanto no enrolamento primário como no enrolamento secundário e que a área de seção reta é de 10 cm^2 , o fator de empilhamento $k=0.96$, e, fazendo o caminho médio l como sendo π vezes o diâmetro médio, que é de 12.5 cm , temos:

3.4 Registro do ciclo de histerese em 60 Hz

Material utilizado

02 -- Multímetros digitais HP 973 A *TRUE RMS*;

01 -- Autotransformador monofásico variável, 0-250 V, 5 A;

01 -- Módulo de madeira e fórmica para montagem;

01 -- Osciloscópio de memória digita HP 54503A;

01 -- Transformador monofásico 800 VA, 127 / 220 / 380 V, núcleo de grãos orientados;

01 -- Transformador monofásico 1 kVA, 110 V / 220 V, núcleo de grãos não-orientados;

01 -- Transformador monofásico 23 V / 23 V, núcleo toroidal;

01 -- Resistor 2.1 Ω

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi montado o circuito mostrado na figura 40. Em seguida, aplicou-se tensão de modo a ter-se no secundário a tensão nominal. Por conveniência, o primário escolhido foi o lado de baixa. O osciloscópio, que recebia em um canal um sinal de tensão proporcional à corrente no primário e no outro canal, um sinal de tensão proporcional ao fluxo concatenado, advindo do integrador. O osciloscópio ainda, transformou os sinais de tensão recebidos em pontos, pontos esses que pôde registrar em uma memória, e posteriormente enviá-los ao PC, através da placa de interface GPIB.

Em seguida, a tensão no secundário foi aumentada para 1.2 p.u. e o processo se repetiu.

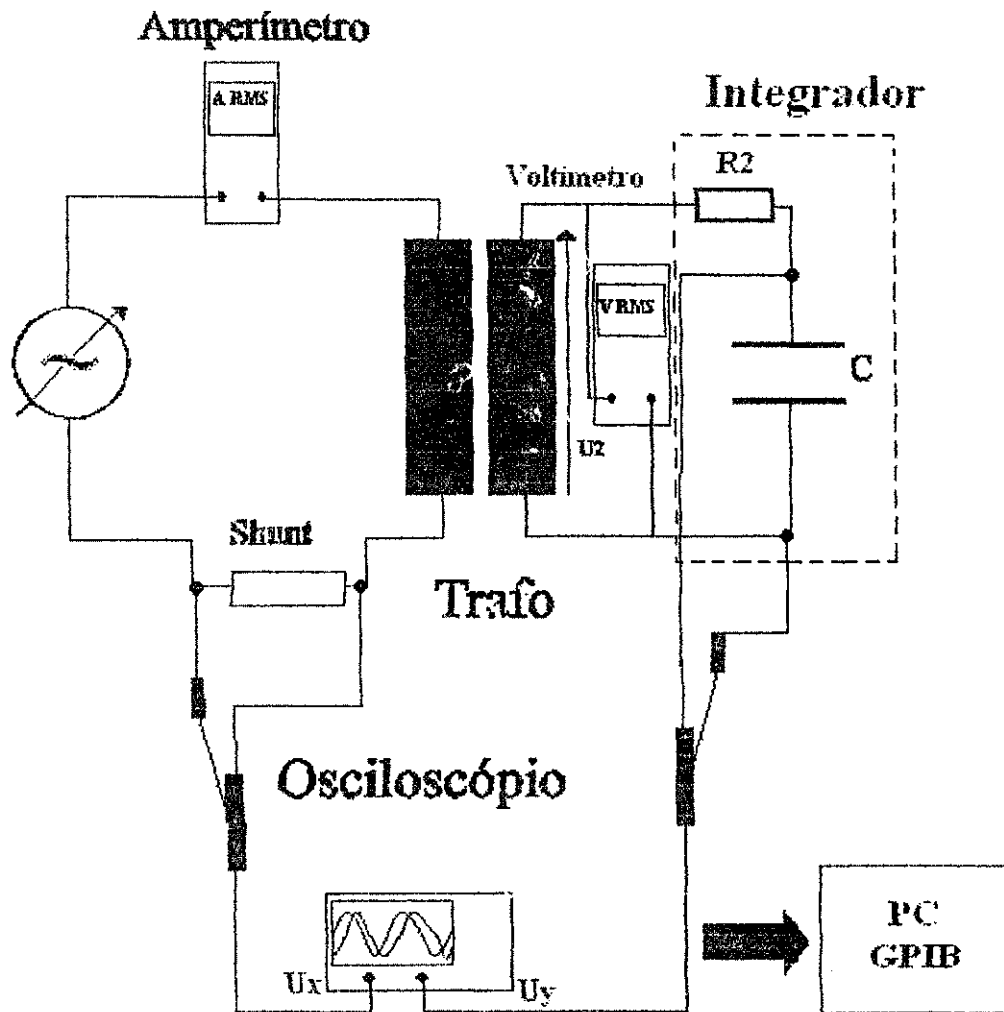


Figura 41: Diagrama de montagem para registro do ciclo de histerese

Para gerar o gráfico do laço de histerese, obteve-se os pontos de fluxo no tempo em um arquivo e em outro os pontos de corrente no tempo. Com o auxílio de um software gráfico, o GRAPHER[®], foram juntados os dois arquivos, multiplicando-se pelas constantes adequadas, de modo a eliminar o tempo e obter assim, o laço de histerese na devida escala. Os resultados daí obtidos foram:

3.4.1 Transformador G.O.

Para 1.0 p.u. as curvas obtidas foram:

FLUXO CONCATENADO (Wb esp)

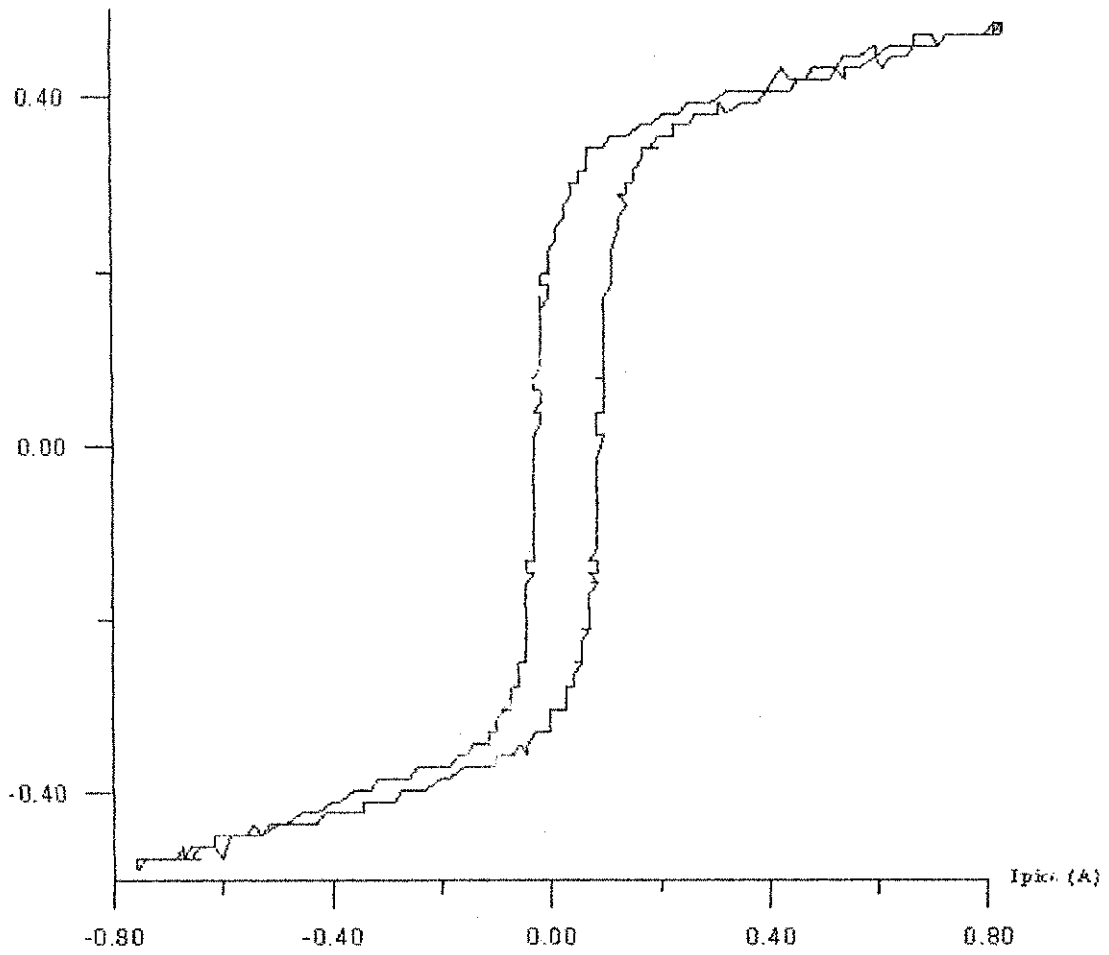


Figura 42: Ciclo de histerese fluxo-corrente para transformador GO com tensão de entrada de 1.0 p.u.

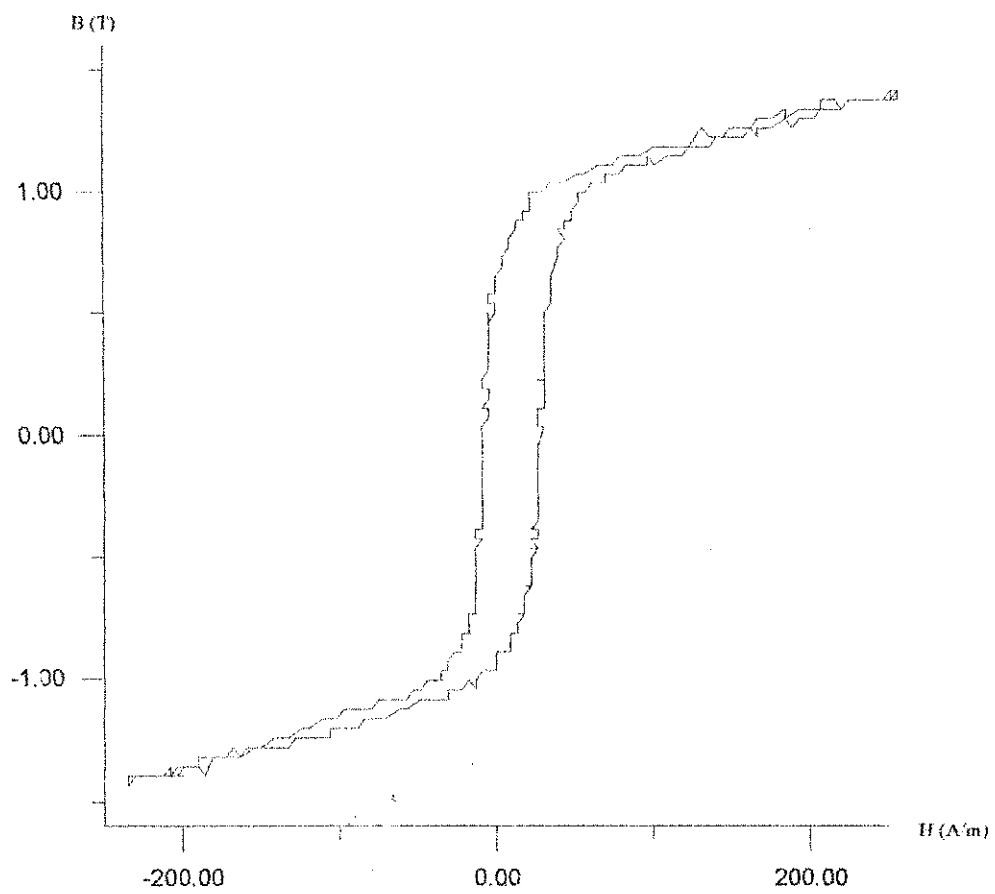


Figura 43: Ciclo de histerese B-H para transformador GO com tensão de entrada de 1.0 p.u.

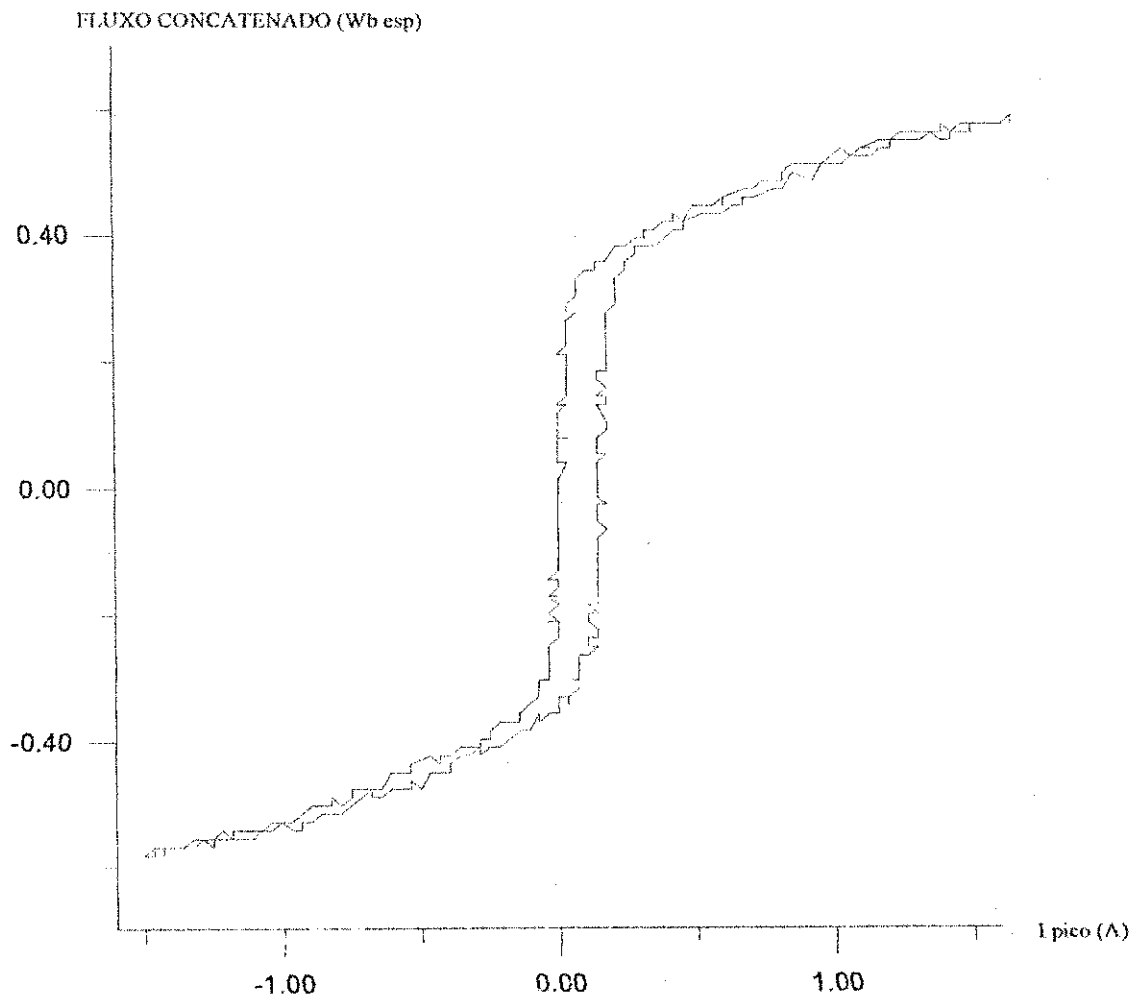


Figura 44: Ciclo de histerese fluxo-corrente para transformador GO com tensão de entrada de 1.2 p.u.

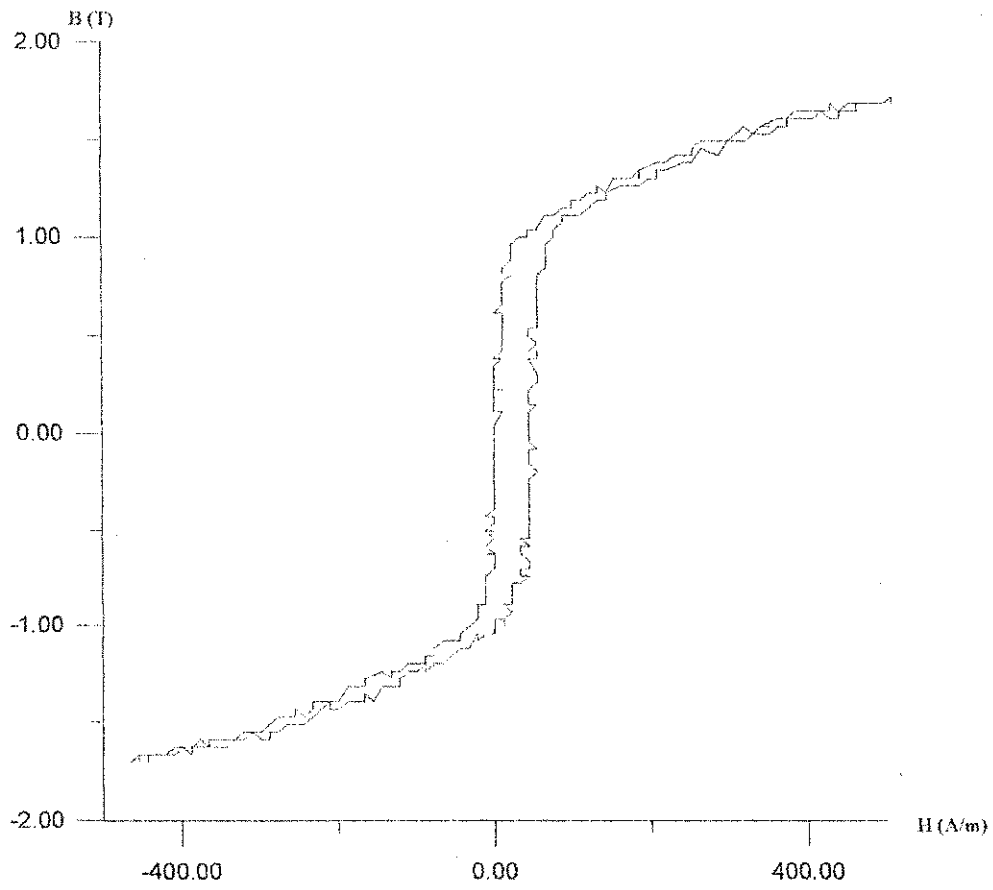


Figura 45: Ciclo de histerese B-H para transformador GO com tensão de entrada de 1.2 p.u.

3.4.2 Transformador GNO

Para tensão de entrada em 1 p.u.:

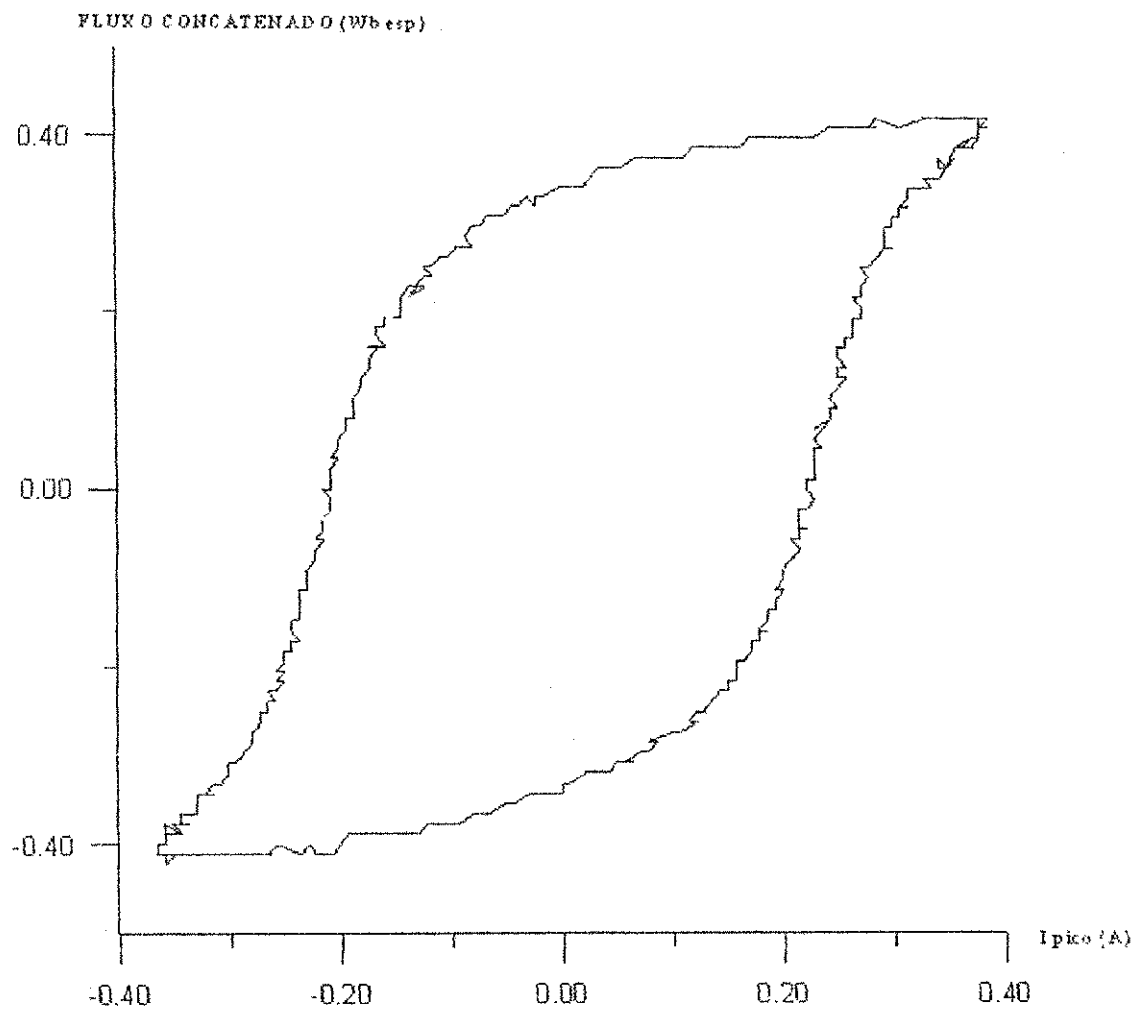


Figura 46: Ciclo de histerese fluxo-corrente para transformador GNO com tensão de entrada de 1.0 p.u.

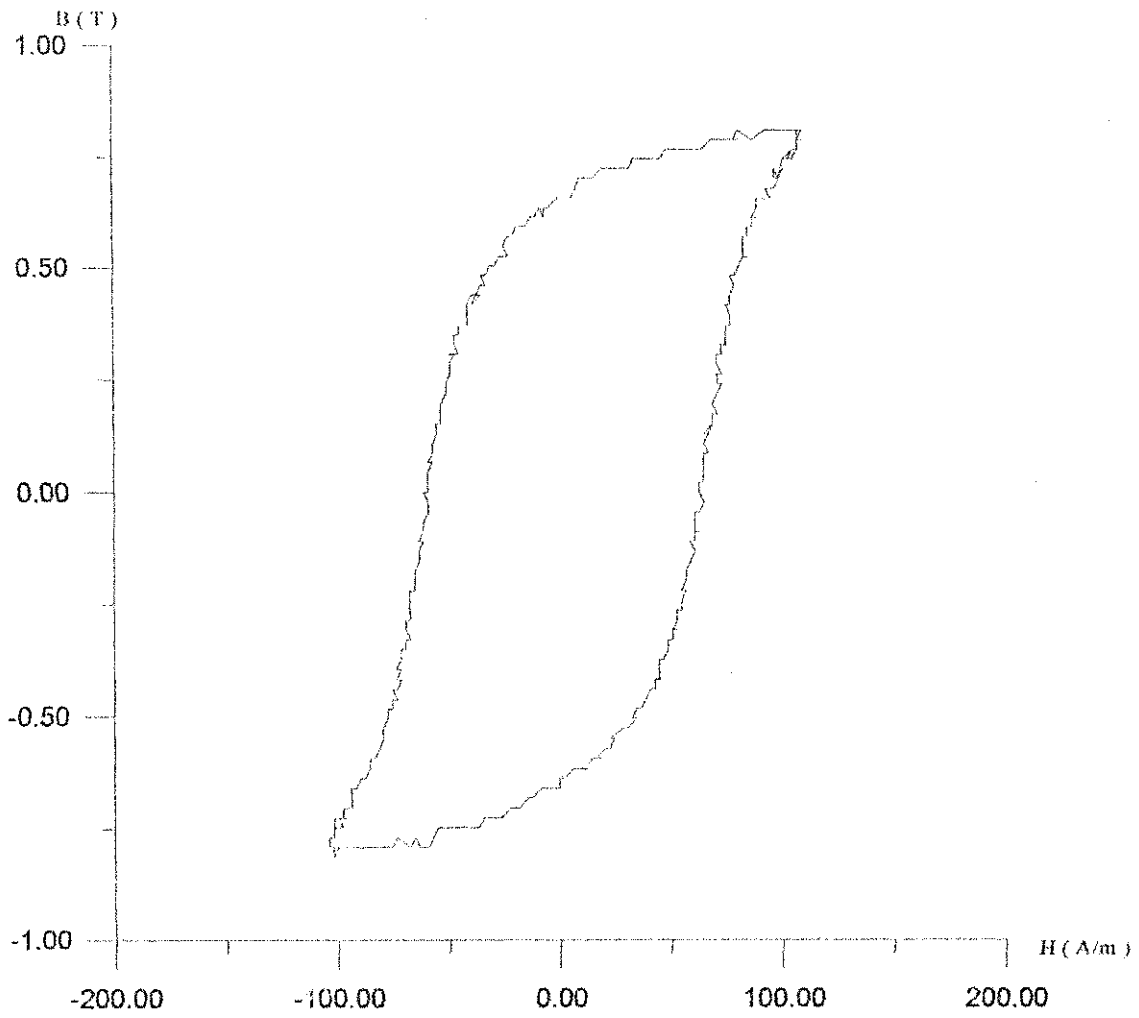


Figura 47: Ciclo de histerese B-H para transformador GNO com tensão de entrada de 1.0 p.u.

Para tensão de entrada em 1.2 p.u.:

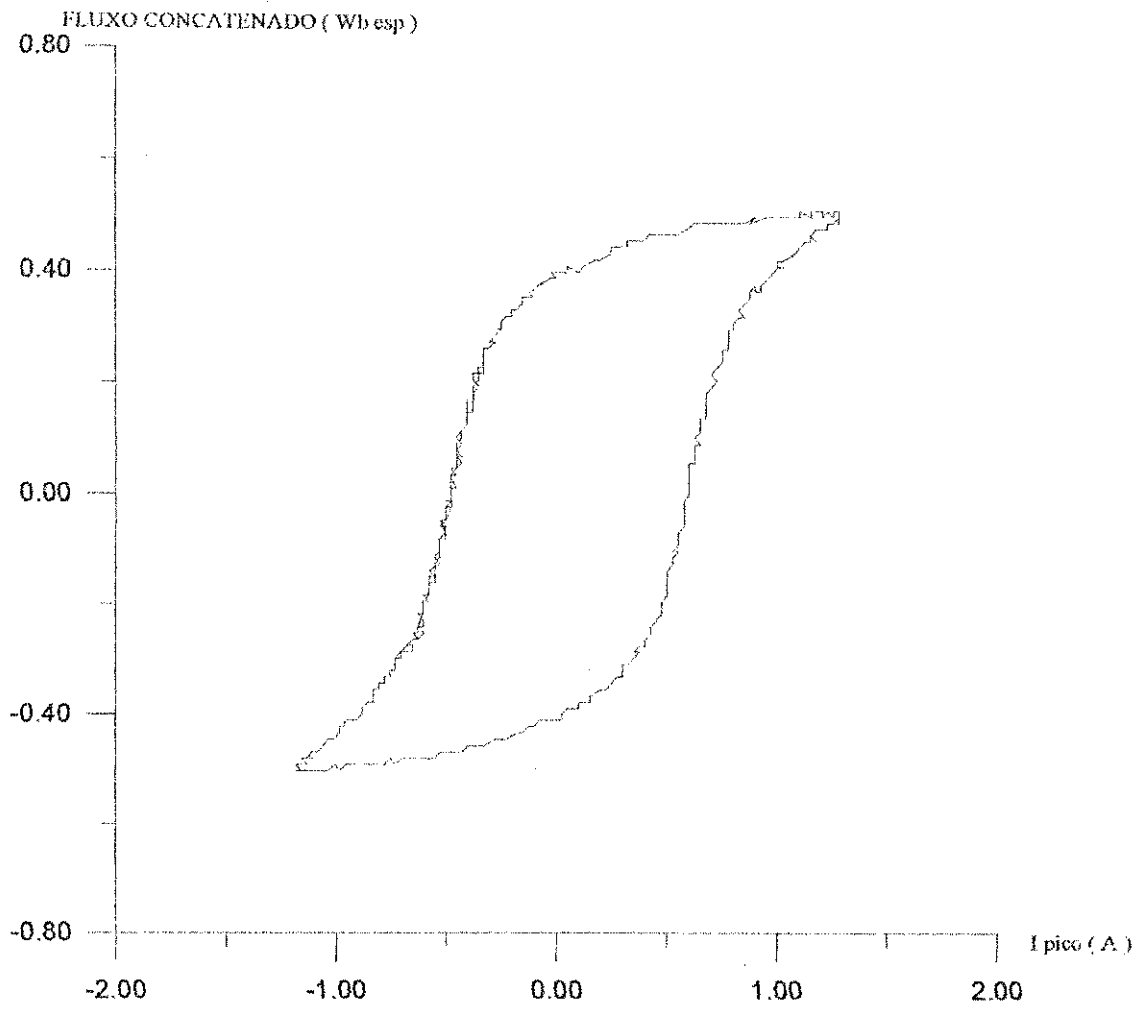


Figura 48: Ciclo de histerese fluxo-corrente para transformador GNO com tensão de entrada de 1.2 p.u.

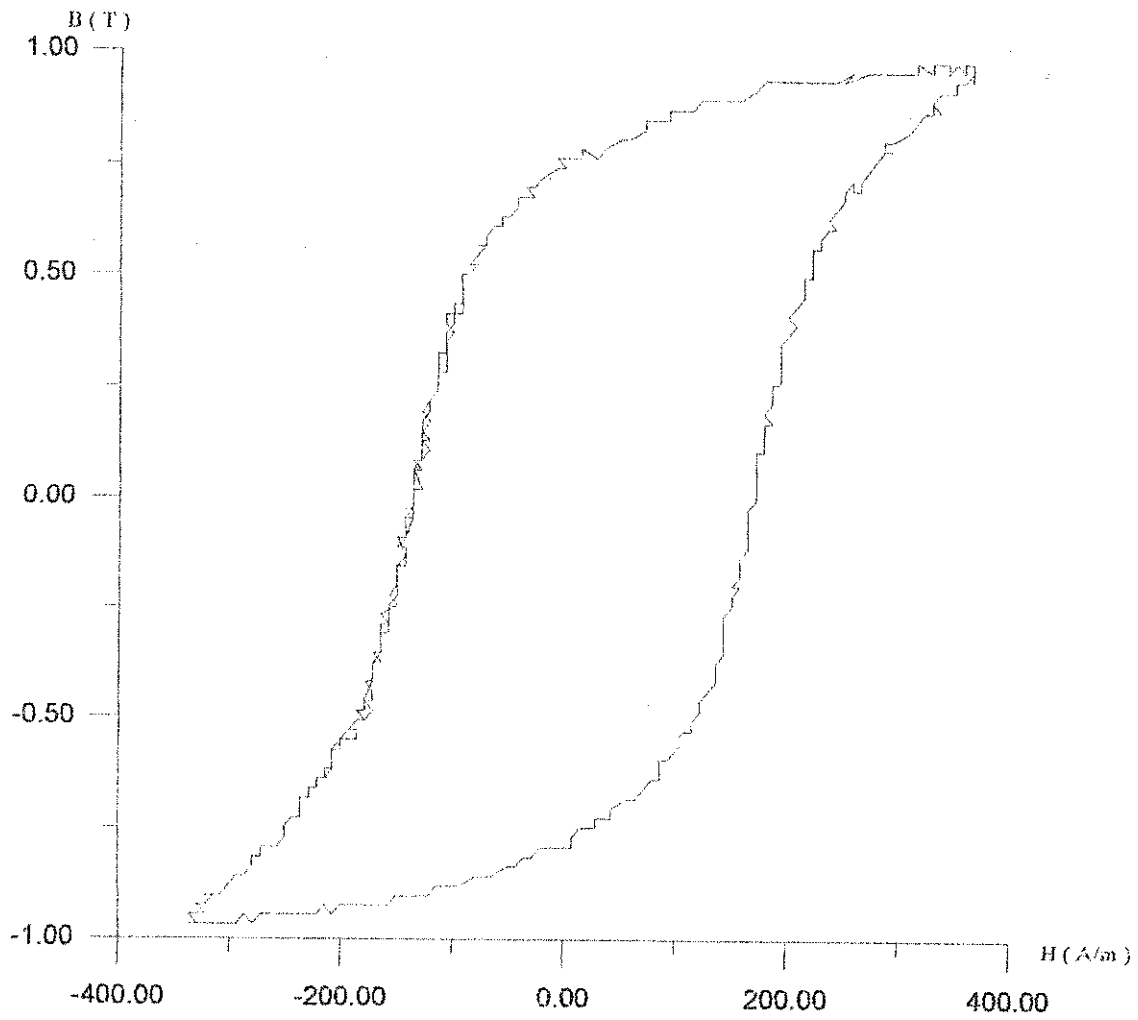


Figura 49: Ciclo de histerese B-H para transformador GNO com tensão de entrada de 1.2 p.u.

3.4.3 Transformador Núcleo toroidal

Para tensão de entrada em 1 p.u.:

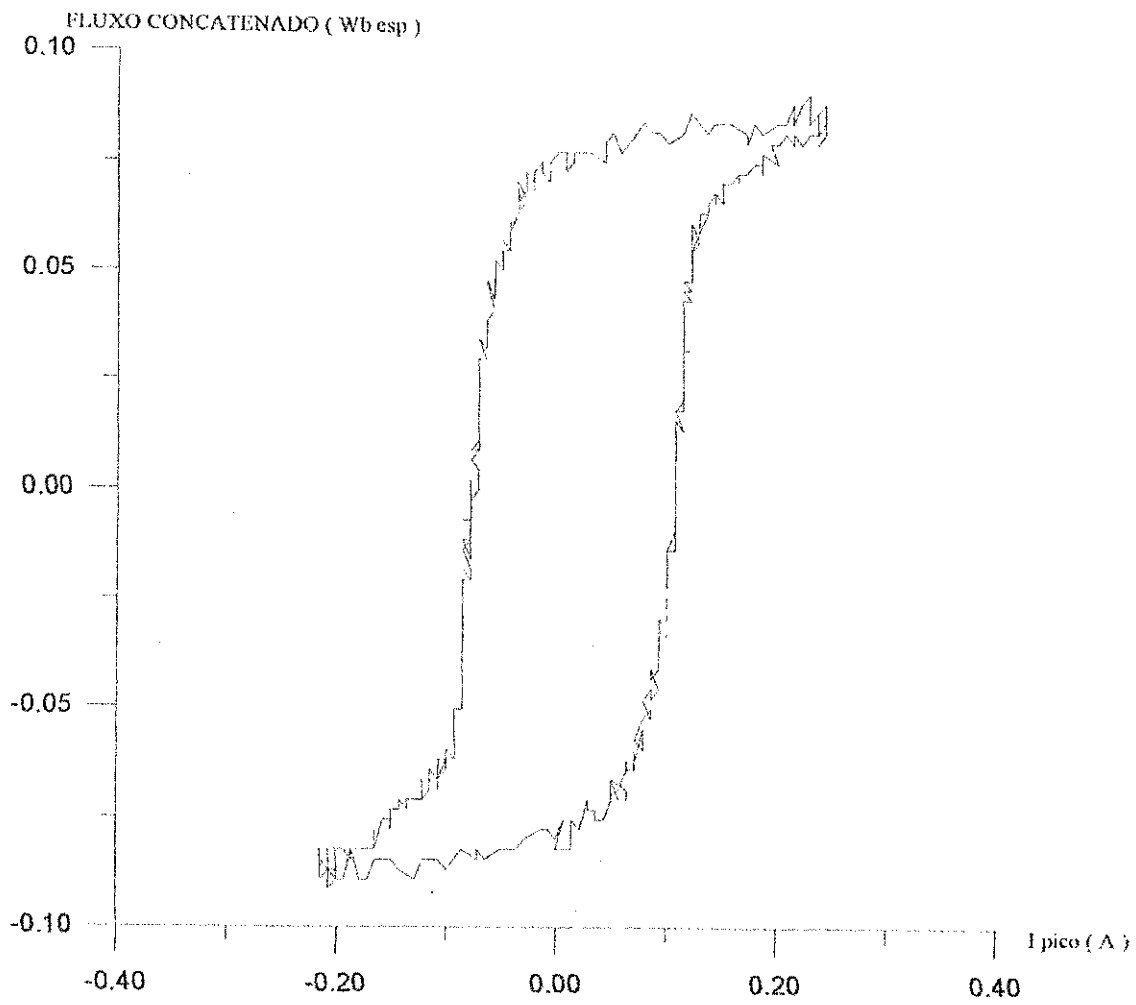


Figura 50: Ciclo de histerese fluxo-corrente para transformador toroidal com tensão de entrada de 1.0 p.u.

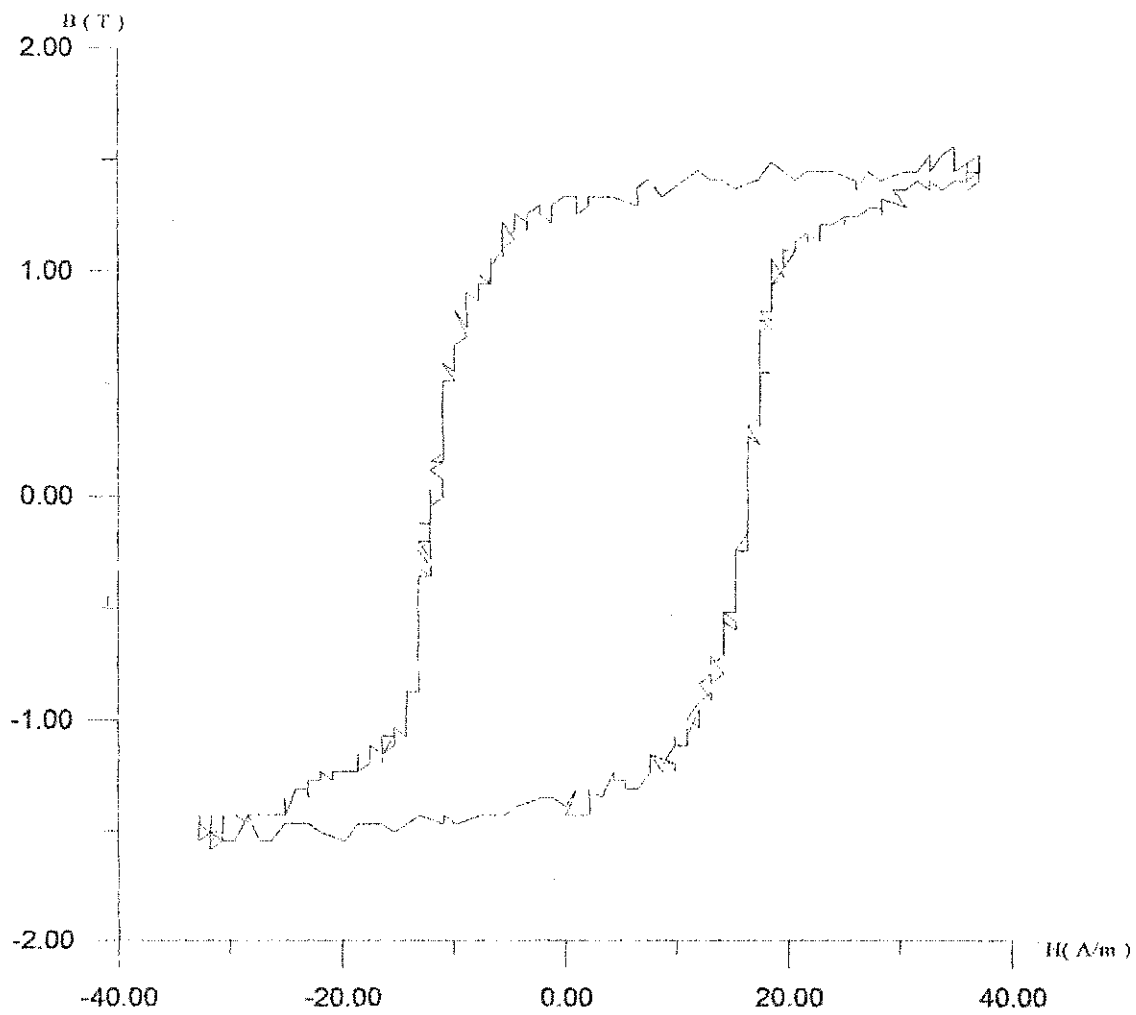


Figura 51: Ciclo de histerese B-H para transformador toroidal com tensão de entrada de 1.0 p.u.

Para 1.2 p.u. de tensão de entrada:

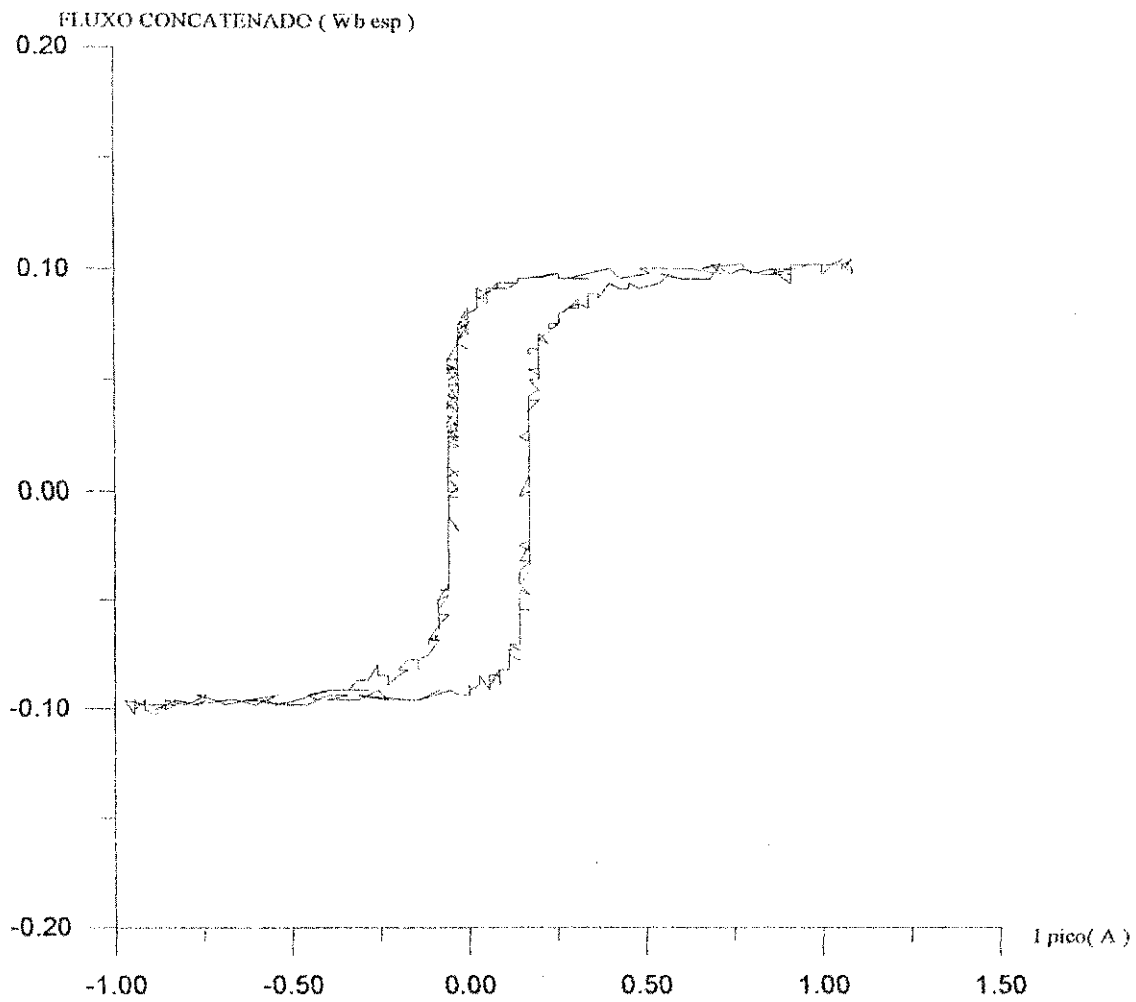


Figura 52: Ciclo de histerese fluxo-corrente para transformador toroidal com tensão de entrada de 1.0 p.u.

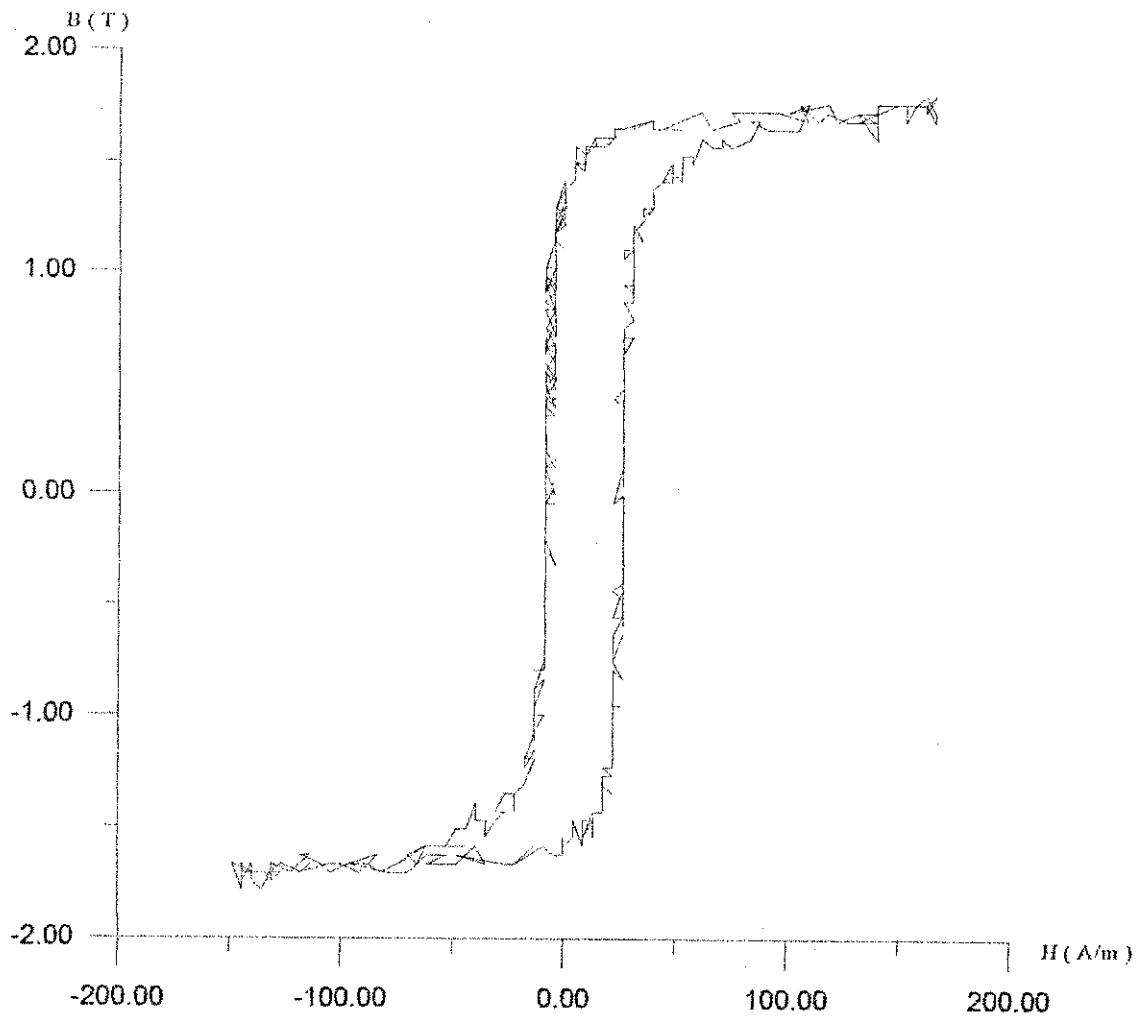


Figura 53: Ciclo de histerese B-H para transformador toroidal com tensão de entrada de 1.0 p.u.

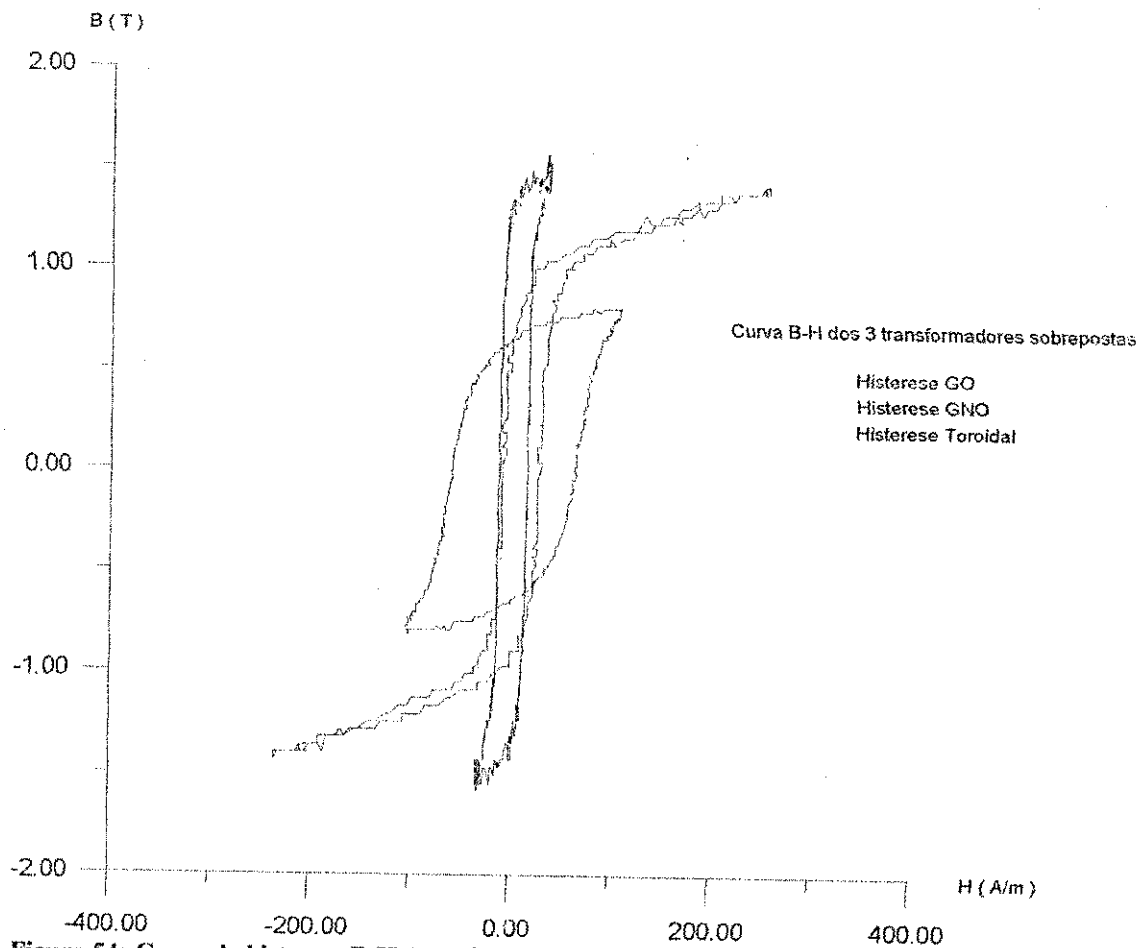


Figura 54: Curva de histerese B-H dos três transformadores sobrepostos em 1.0 p.u. de tensão de entrada

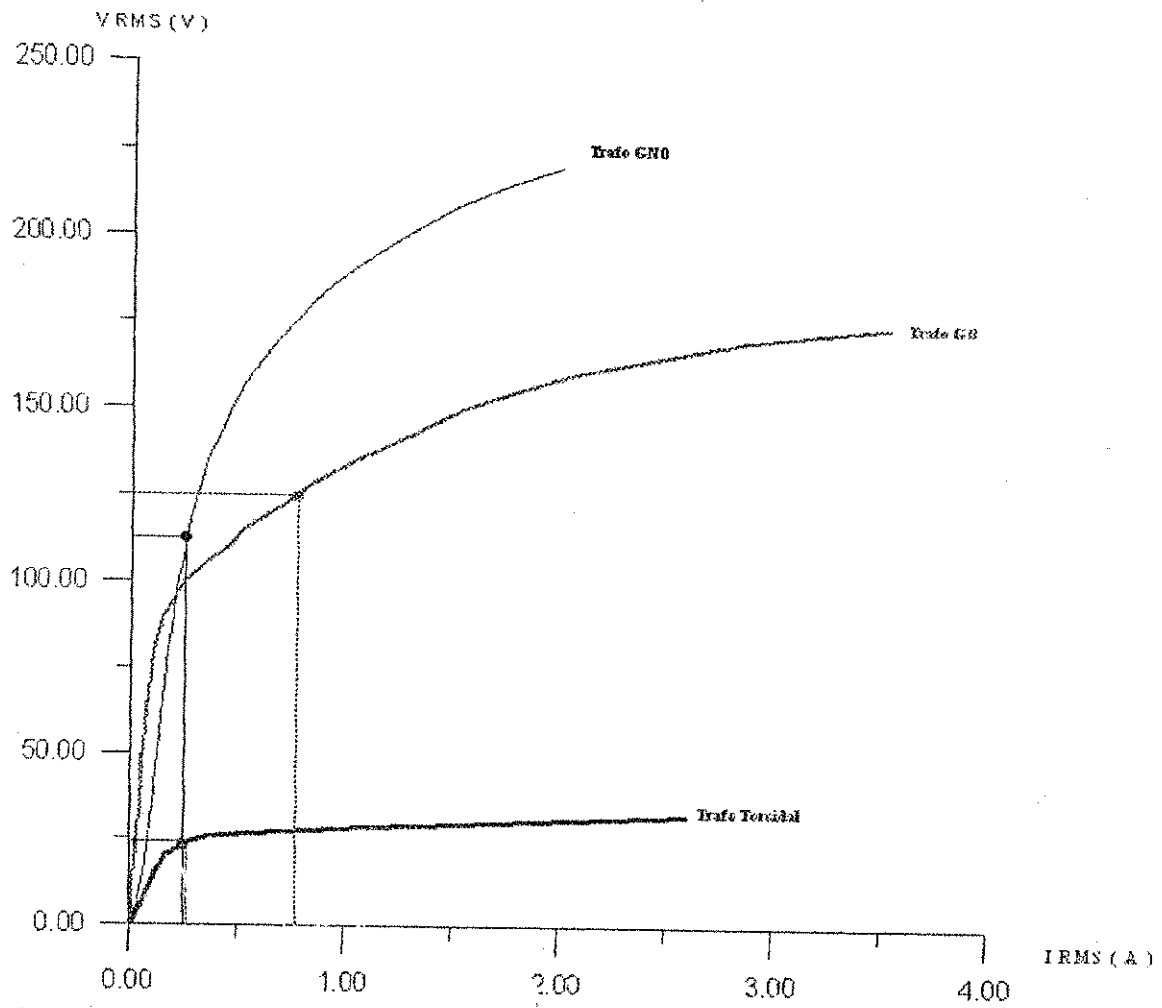


Figura 55: Curva V I dos 3 trafos sobrepostos

4. CONCLUSÃO

Na figura 54 sobrepõe-se o ciclo de histerese dos três trafos utilizados nesse trabalho. Perceber-se-á facilmente que o material utilizado no núcleo do trafo GNO apresenta uma indução magnética máxima $B_{máx}$ menor que os demais. Isso faz com que haja mais ferro ou cobre que num trafo com indução magnética maior e isso implica em perdas maiores. Na figura 55 estão sobrepostas as curva de tensão corrente inicial dos trafos utilizados neste trabalho. Um ponto mostra a tensão nominal do mesmo. Percebe-se que o trafo GNO está muito aquém da saturação, o que implica que o núcleo está superdimensionado.

Como foi demonstrado nesse trabalho, as perdas no núcleo são proporcionais por histerese são proporcionais à sua largura. Assim sendo, a maior perda por histerese será a do transformador GNO.

Ao fim deste trabalho ainda constata-se quão útil são os instrumentos de natureza digital, por sua versatilidade. O osciloscópio utilizado por exemplo, serviu como voltímetro, amperímetro, e como wattímetro, poderia ter sido utilizado ainda como fasímetro, freqüencímetro ou outros instrumentos.

5. Bibliografia

- [1] Guerra, Francisco das Chagas F., “Apostila de transformadores” Campina Grande 2006
- [2] Schmidt, W. “Materiais Eléctricos - Vol. 2 - Isolantes e Dieléctricos”, 2ª ed., Edgard Blücher, São Paulo, 1979.
- [3] Toro, Vincent del “Fundamentos de Máquinas Eléctricas” Prantice Hall do Brasil
- [4] Sen, P. C. “Principles of Electric Machines and Power Electronics”, Wiley, 1989.
- [5] J.W. Nilsson, Circuitos Eléctricos. - 6ª Edição. LTC. 2003.
- [6] Montero, Luis Reyes Rosales – “Apostila de Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia”, Campina Grande.

Anexos

Determinação do número de espiras do transformador G.N.O.

Um parâmetro importante para o conhecimento da indução magnética B foi emitido pelo fabricante. Assim, para determinar o número de espiras do primário e do secundário foi usado o seguinte artifício: Primeiro foi feito um enrolamento com fio esmaltado envolvendo os enrolamentos do transformador. Conhecendo o número de espiras dessa bobina de prova, que foi de 28, aplicou-se tensões sobre o secundário do transformador, medindo tensão de entrada e a tensão induzida na bobina. Os resultados foram os seguintes:

Tabela A-1 - Determinação experimental do número de espiras do transformador G.N.O.

V entrada (V)	V induzido (V)
10	2.1
20.6	4.29
30.7	6.38
40.8	8.43
50.4	10.43
60.4	12.52
70.7	14.66
80.6	16.7
90	18.65
100.4	20.8
110.3	22.86
121.3	25.17
130	26.92
148.5	30.77

O resultado da relação de espiras N_2 encontrado foi:

Tabela A-2 Relação de espiras obtidas

Medição	Relação obtida
1	133.3333
2	134.4522
3	134.7335
4	135.516
5	135.302
6	135.0799
7	135.0341
8	135.1377
9	135.1207
10	135.1539
11	135.1006
12	134.9384
13	135.2155
14	135.1316

Fazendo a média aritmética, encontrou-se $N_2 = 134.95$.

Assim, admitimos que N_2 é de 135 espiras. Como a relação de transformação do transformador em questão é de 2:1, tendo 220 V como tensão nominal no lado de alta e 110 V, no lado de baixa, achamos que N_1 é de 270 espiras.

Transformadores União Ltda.



Universidade Federal da Paraíba
Caixa Postal 583
58100 - Campina Grande - Paraíba

At. Dr. Erich Markworth

T 11
33
35

Transformadores União Ltda.

FL 2 da carta de 29/3/88 dirigida Universidade Federal da Paraíba
nossa carta T1/FGK/cg/003

Transformador #5 Monofásico (1)

Núcleo

Diâmetro (mm) : 56.5
Seção (cm²) : 15.36
Indução (KG) : 14.00

Enrolamento Interno

Nº Espiras : 384
Fio/Seção Efetiva (mm²) : AWG 11 i = 0.28 - pp/4.17
Densidade (A/mm²) : 0.87

Enrolamento Externo

Nº Espiras : 663
Fio/Seção Efetiva (mm²) : AWG 15 i = 0.28 - pp/2.63
Densidade (A/mm²) : 0.80

Sem mais, aproveitamos o ensejo para apresentar as nossas

Saudações,

Keller-
TUSA-TI.

Sua carta de

Nossa carta de

T1/FGK/cg/003

Jundiaí, 29/3/88.

Prezados Senhores,

Keller (011) 434-6188 R.259

Atendendo o solicitado informamos:

Transformadores Trifásicos (2)

Núcleo

Diâmetro (mm) : 49.5
Seção (cm²) : 11.76
Indução (KG) : 13.88

Enrolamento Interno

Nº Espiras : 504
Fio/Seção Efetiva (mm²) : AWG 16 - ER/1.31
Densidade (A/mm²) : 0.93

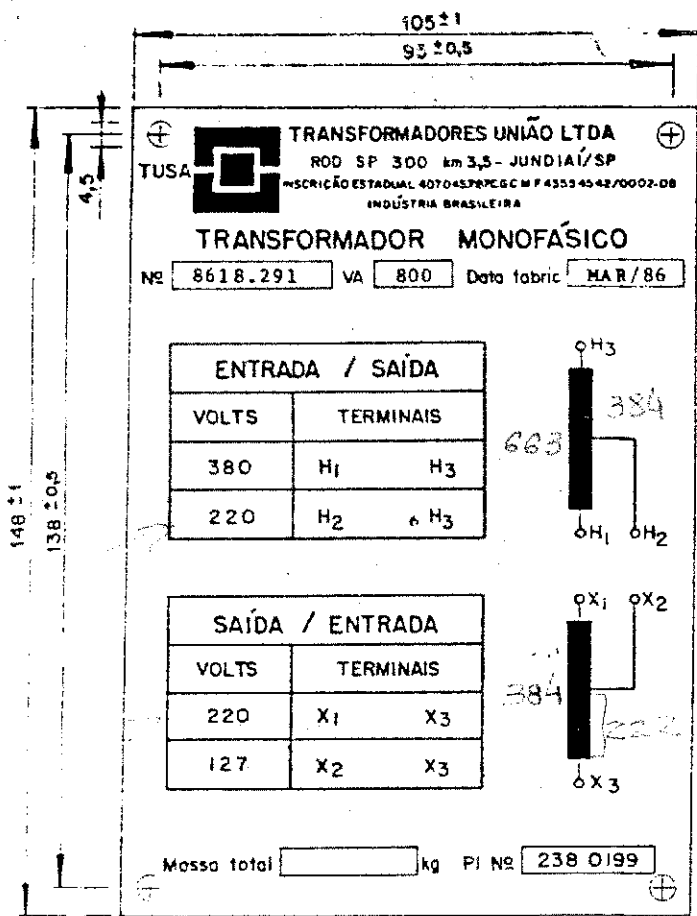
Enrolamento Externo

Nº Espiras : 292
Fio/Seção Efetiva (mm²) : AWG 13 i = 0.28 - pp/2.63
Densidade (A/mm²) : 0.80

Enrolamento Terciário

Nº Espiras : 91
Fio/Seção Efetiva (mm²) : AWG 14 i = 0.28 - pp/2.08
Densidade (A/mm²) : 1.07

.../...



771

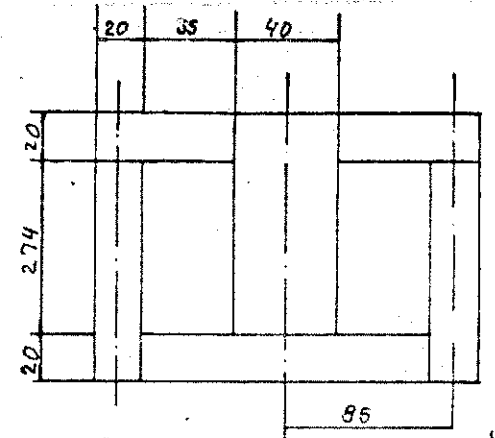
IDENTIFICAÇÃO
Módulo - O.I.

- NOTAS:
- a) Espaço inferior reservado para eventuais marcações do cliente
 - b) Gravações em baixo relevo na cor preta e o fundo na cor do material
 - c) A não observação das tolerâncias, irregularidades da gravação, superfície metálica porosa e falta de aderência da tinta, serão condições de rejeição
 - d) A gravação nos espaços será feita na fábrica após os ensaios

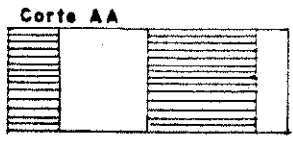
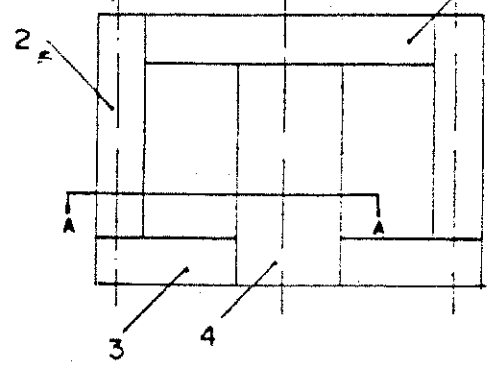
24 (01/83) 500 folhas

1	1	Placa	0,8 x 105 x 148	Al anodizado		
Pos	O.I.	Denominação	medidas	Material	Mat Cortado	
	Módulo	Desenho / Norma		Cod Mat.	Norma Mat Cort.	
		Elab. Ademar	Data 24/02/86	PLACA IDENTIFICAÇÃO		

Cad A 1,2 e 3



Comodos 4,5 a 6



Distribuição
Seção - O.I.

24 (09/84) 1000 folhas

4	128	Chepe	40 x 294	FeSi-M5		
3	256	Chepe	20 x 95	FeSi-M5		
2	256	Chepe	20 x 394	FeSi-M5		
1	128	Chepe	20 x 150	FeSi-M5		
Pos	O.I.	Denominação	medidas	Material	Mat Cortado	
	Unid	Desenho / Norma		Cod Mat	Norma Mat Cort.	
		Elab. <i>deute</i>	Data 15/10/86			

6.4 Comparação de desempenho

A Tabela 6.4 apresenta os resultados de ensaios experimentais realizados com o objetivo de estabelecer as bases de comparação entre o protótipo de transformador de 1-kVA, 220 V/220 V, 60 Hz, projetado e construído com núcleo de material amorfo, e um outro transformador comercial, com os mesmos valores nominais, porém construído com núcleo de FeSi.

Tabela 6.4 - Ensaios comparativos entre o protótipo de transformador com núcleo de material amorfo e um transformador comercial com núcleo de FeSi.

Transformador com núcleo de material amorfo: 1,0 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz.	Transformador comercial: 1,0 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz.
Ensaio em vazio:	Ensaio em vazio:
tensão de circuito aberto, $V_{ca} = 110 \text{ V}$	tensão de circuito aberto, $V_{ca} = 110 \text{ V}$
Potência de circuito aberto, $P_{ca} = 2,5 \text{ W}$	Potência de circuito aberto, $P_{ca} = 19 \text{ W}$
Corrente de excitação = 0,14 A	Corrente de excitação = 0,24 A
Ensaio de curto-circuito:	Ensaio de curto-circuito:
Tensão de curto-circuito, $V_{cc} = 10,2 \text{ V}$	Tensão de curto-circuito, $V_{cc} = 10,2 \text{ V}$
Corrente de curto-circuito, $I_{cc} = 4,4 \text{ A}$	Corrente de curto-circuito, $I_{cc} = 4,5 \text{ A}$
Potência de curto-circuito, $P_{cc} = 41,5 \text{ W}$	Potência de curto-circuito, $P_{cc} = 44,0 \text{ W}$
Medição das resistências:	Medição das resistências:
Resistência do primário, $R_p = 1,1 \Omega$	Resistência do primário, $R_p = 1,1 \Omega$
Resistência do secundário, $R_s = 0,35 \Omega$	Resistência do secundário, $R_s = 0,35 \Omega$

Com base nos cálculos de projeto e nos resultados experimentais, a Tabela 6.5 apresenta dados que permitem comparar diretamente os valores de projeto, os valores reais obtidos com o protótipo realizado e aqueles obtidos com o transformador comercial.

