



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ERICSON NORBERTO ALVES SANTOS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

CARACTERIZAÇÃO DE LAMINAÇÕES MAGNÉTICAS DE HIDROGERADORES

PARA ESTUDOS ANALÍTICOS E DE CÁLCULO DE CAMPO

Campina Grande, Paraíba

Maio de 2013

ERICSON NORBERTO ALVES SANTOS

CARACTERIZAÇÃO DE LAMINAÇÕES MAGNÉTICAS DE HIDROGERADORES
PARA ESTUDOS ANALÍTICOS E DE CÁLCULO DE CAMPO

*Relatório final de estágio supervisionado
submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Máquinas Elétricas

Orientador

Professor Edgar Roosevelt Braga Filho, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Maio de 2013

ERICSON NORBERTO ALVES SANTOS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

*Relatório final de estágio supervisionado
submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Máquinas Elétricas

Aprovado em: ____/____/____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Edgar Roosevelt Braga Filho, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande, Paraíba

Maio de 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao Deus pai todo poderoso por ter me permitido chegar ao final de um curso tão difícil, superando obstáculos e tantas outras barreiras. Agradeço a minha amada mãe, dona Maria Enizabeth pela paciência e por ter acreditado em mim ao longo destes últimos cinco anos, agradeço aos meus irmãos pela confiança e pelo apoio sempre presente, agradeço profundamente aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, que não mediram esforços na transmissão do bem mais precioso que carregarei pelo resto da vida, o conhecimento. Agradeço aos amigos que fiz, ao longo do curso e que tantas vezes partilharam as angústias e alegrias, agradeço aos amigos do NERG nas pessoas de Manoel Adalberto Guedes e Francisco Cândido Filho e, por fim, agradeço ao professor Edgar R. Braga Filho pela oportunidade de estágio nas dependências do Núcleo de Energia (NERG/CEEI/UFCG) e pelos ensinamentos transmitidos durante minha vida acadêmica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de laço de histerese magnética	3
Figura 2.2: Diagrama sinótico do circuito de ensaio	6
Figura 2.3: Diagrama da bancada experimental	8
Figura 2.4: Diagrama da bancada experimental	9
Figura 2.5: Bancada experimental	9
Figura 3.1: Chapas de aço do rotor de alternadores usados em UHE's	10
Figura 3.2: Processamento das chapas de aço	11
Figura 3.3: Chapa de aço processada	12
Figura 3.4: Soldagem das fitas de aço	12
Figura 3.5: Enrolamento das fitas de aço	12
Figura 3.6: Dimensões do anel toroidal.....	13
Figura 3.7: Diagrama sinótico da montagem experimental.....	14
Figura 3.8: Associação de resistores	14
Figura 3.9: Bancada experimental	15
Figura 3.10: Curva de magnetização – Amostra I.....	19
Figura 3.11: Curva de magnetização – Amostra II.....	20
Figura 3.12: Curva de magnetização – Amostra III	22
Figura 3.13: Curva de magnetização – Amostra I.....	23
Figura 3.14: Curva de magnetização – Amostra I.....	24
Figura 3.15: Curva de magnetização – Amostra I.....	25
Figura 3.16: Curva de magnetização – Amostra II.....	26
Figura 3.17: Curva de magnetização – Amostra II.....	27
Figura 3.18: Curva de magnetização – Amostra II.....	28
Figura 3.19: Curva de magnetização – Amostra III	29
Figura 3.20: Curva de magnetização – Amostra III	30
Figura 3.21: Curva de magnetização – Amostra III	31
Figura 3.22: Curva de magnetização – Amostras I-II-III	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados experimentais – Amostra I	16
Tabela 2: Dados experimentais – Amostra II	16
Tabela 3: Dados experimentais – Amostra III	17
Tabela 4: Valores de campo e fluxo – Amostra I	18
Tabela 5: Valores de campo e fluxo – Amostra II	19
Tabela 6: Valores de campo e fluxo – Amostra III	21

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
SUMÁRIO	vii
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	01
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	03
2.1 RELAÇÕES BÁSICAS.....	04
2.2 A PLATAFORMA DE ENSAIO	08
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	10
3.1 OBJETIVOS DO EXPERIMENTO	10
3.2 MONTAGEM DOS ANÉIS DE ROWLAND	10
3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	13
3.4 MONTAGEM DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL	13
3.5 DADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO	15
3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	17
3.7 AJUSTE DE CURVAS	22
4 CONCLUSÃO.....	33
BIBLIOGRAFIA	35
ANEXOS	36

1 INTRODUÇÃO

A maioria das pessoas está familiarizada com os ímãs principalmente na forma de brinquedos ou como objetos simples para manter papéis presos à uma superfície de metal, como uma porta de geladeira. Na verdade, as áreas de aplicação de magnetismo são muito mais amplas e vão, desde áreas ligadas à saúde, comunicação e transporte até muitos outros aspectos da vida cotidiana. Intimamente relacionada com a eletricidade, o magnetismo é resultado de formas específicas de alinhamento por parte das cargas elétricas e magnéticas em certas variedades de metais e ligas.

O magnetismo, juntamente com a eletricidade, pertencem a um fenômeno maior, o eletromagnetismo, ou a força gerada pela passagem de uma corrente elétrica através de materiais condutores. Na verdade, a diferença entre o magnetismo e a eletricidade é puramente artificial. Ambos são manifestações de uma única força fundamental, o eletromagnetismo. Ao nível atômico, o magnetismo é o resultado do movimento dos elétrons, partículas atômicas carregadas negativamente. Os elétrons giram em torno do núcleo do átomo e, também, giram sobre seu próprio eixo. Estes dois tipos de movimento criam um campo magnético entre os elétrons, e como resultado, o elétron assume as propriedades de um ímã minúsculo de polaridades distintas. Em torno deste ímã infinitesimal as linhas de forças magnéticas, que tem origem no pólo norte estabelecido, curvam-se para fora e retornam ao o pólo sul consequente.

A menos de tais considerações iniciais, o objetivo do estágio é consubstanciado na determinação de características magnéticas de amostras de grãos não orientados, tais como o levantamento da curva de magnetização $B-H$, de materiais ferromagnéticos usados na armadura de alternadores de usinas hidroelétricas. Algumas de tais usinas foram retiradas de operação e reconcionadas, em um processo conhecido como repotenciação, em cuja documentação não foram encontradas as curvas de magnetização dos materiais ferromagnéticos anteriormente utilizados.

Tal processo diz respeito à recuperação do parque gerador de usinas hidroelétricas com mais de vinte (20) anos de operação, onde são reconcionadas turbinas e unidades de geração, principalmente a substituição de parte do circuito magnético dos alternadores, como forma de restaurar o rendimento da conversão e, se possível, possibilitar o acréscimo de sua capacidade.

Neste sentido, para efeito de redimensionamento dos circuitos elétrico e magnético da máquina, é imprescindível o conhecimento das características de magnetização dos

materiais constituintes, antes e após tal processo, objetivando a determinação de grandezas de interesse do projeto.

Executou-se então, no laboratório do Núcleo de Energia (NERG), um procedimento experimental que busca levantar as características $B - H$ de tais materiais, compatíveis com estudos analíticos e de cálculo de campos.

1.1 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Tais atividades desenvolvidas durante o período do estágio são designadas a seguir:

- Identificação das amostras de material ferromagnético;
- Limpeza e corte das amostras em lâminas;
- Montagem dos dispositivos usados para a determinação das características $B - H$ do material;
- Ensaio para a determinação dos parâmetros;
- Análise e processamento dos dados obtidos experimentalmente;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Elementos como ferro, níquel, cobalto e alguns outros terras raras (gadolínio, disprósio) exibem um comportamento magnético único, que é chamado de ferromagnetismo (as ferrites são o exemplo mais comum de material ferromagnético). Os materiais ferromagnéticos apresentam um fenômeno a nível atômico, que faz com que os momentos magnéticos nucleares alinhem-se paralelamente uns com os outros em uma região denominada domínio magnético. Dentro do domínio, a magnetização é intensa, mas uma pequena amostra do material se apresentará, geralmente, desmagnetizada haja vista os diversos domínios estavam orientados aleatoriamente um em relação ao outro. Impondo um pequeno campo magnético externo, pode-se fazer com que os domínios magnéticos alinhem-se a este campo. A densidade do fluxo magnético no material será então aumentada por um fator chamado de permeabilidade relativa em comparação com a densidade de fluxo magnético no vácuo, $\mu_0 H$. Todos os materiais ferromagnéticos possuem um limite de temperatura máxima na qual esta propriedade desaparece como resultado da agitação térmica. Esta temperatura é chamada de temperatura de Curie [6].

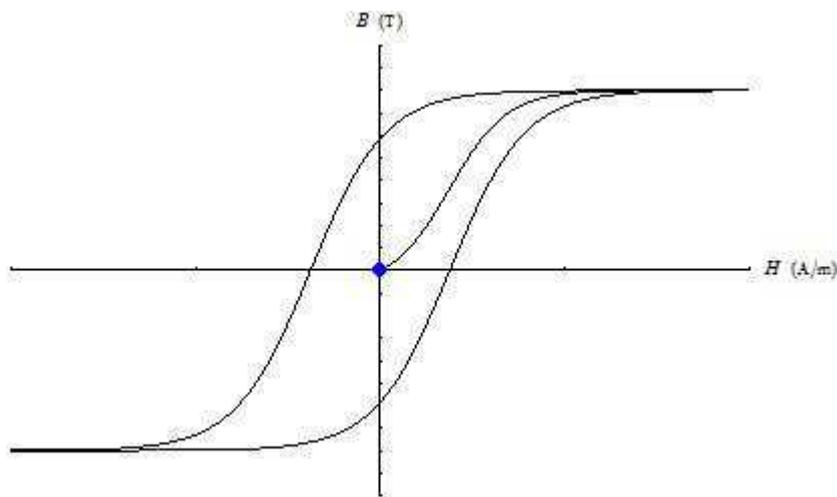


Figura 2.1: Exemplo de laço de histerese magnética.

Quando um material ferromagnético é magnetizado em uma determinada direção, este não se desmagnetizará completamente quando o campo magnetizante aplicado for removido. Deve-se então aplicar um campo na direção oposta, de modo a restaurar o material ferromagnético à sua condição inicial. Se um campo magnético alternado é aplicado ao material, a sua curva de magnetização apresentará uma evolução chamado de ciclo de

histerese (figura 2.1). A falta de "memória" da curva de magnetização é a propriedade denominada de histerese magnética e está relacionada com a existência dos domínios magnéticos no material. Uma vez que os domínios magnéticos são reorientados, é necessária certa quantidade de energia para trazê-los de volta a sua configuração inicial. Esta propriedade dos materiais ferromagnéticos é útil como uma "memória" magnética das amostras. Algumas composições de materiais ferromagnéticos retém, indefinidamente, uma parte da magnetização imposta à liga tornando-as úteis como ímãs permanentes [6].

2.1 RELAÇÕES BÁSICAS

No vácuo, a densidade do fluxo magnético gerado ou indução magnética é proporcional ao campo aplicado H [5]:

$$B = \mu_0 H \quad (2.1)$$

onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V s/Am}$. A unidade do campo magnético é A/m e para a densidade de fluxo magnético, a unidade é $\text{V s/m}^2 = 1 \text{ Tesla}$. Se um material ferromagnético estiver presente, a equação torna-se

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (2.2)$$

onde μ_r é a permeabilidade relativa do material. A permeabilidade relativa é um número adimensional que caracteriza o grau de pureza do material. É útil e conveniente dividir a densidade de fluxo B de acordo com

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.3)$$

sendo M é o vetor magnetização (momento magnético total), dependente somente do material. Observa-se que, através um material ferromagnético, a densidade de fluxo magnético, gerada no material, não é proporcional ao campo aplicado H . Em vez disso, ela atinge um valor de saturação B_s com o aumento do campo magnético H . A permeabilidade relativa para o material depende da força do campo magnético H , e também do tratamento

magnético do material. Em um material totalmente desmagnetizado, a intensidade do campo magnético é $B = 0 T$ em $H = 0 A/m$. No entanto, normalmente, o material ainda mantém uma densidade de fluxo magnético B residual quando $H = 0 A/m$ (remanescente). Assim, a curva de histerese difere da curva de magnetização, que começa na origem do sistema de coordenadas e só pode ser medida para o material completamente desmagnetizado ($H = 0 A/m, B = 0 T$) [5].

A curva de magnetização de um material ferromagnético pode ser obtida usando dispositivo conhecido como anel de Rowland¹. O anel é composto pelo material ferromagnético, o qual se deseja obter as características de magnetização, e é composto por duas partes: uma bobina primária sob a forma de um toróide, que gera o campo magnético externo e uma bobina secundária que mede a densidade de fluxo magnético B total. Os valores da intensidade do campo magnético e de indução magnética podem ser obtidos indiretamente através da monitorização da corrente i , aplicada na bobina primária do anel, e do fluxo magnético ϕ induzido através do núcleo, tendo em conta as relações [2] [3]

$$H = \frac{N_1}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \cdot i_\phi \quad (2.4)$$

e

$$B = \frac{\phi}{N_2 A} \quad (2.5)$$

Onde, para (2.5), N_1 representa o número de espiras da bobina primária, N_2 o número de espiras da bobina secundária, r_m o raio médio do anel, A a área da seção reta do núcleo, i_ϕ a corrente de excitação no primário e ϕ o fluxo induzido. Para a obtenção dos sinais necessários à determinação da curva $B - H$, característica do material, montou-se uma plataforma de ensaio cujo circuito é especificado no diagrama sinótico da figura 2.2.

O acoplamento $N_1 - N_2$ representa o anel de Rowland, R_2 , R_1 e C são resistências e capacitor externos, respectivamente. O circuito é alimentado por um variac V_{AC} . O resistor R_1 deve ter um valor suficiente de modo que o secundário possa ser considerado como um circuito aberto. Nesta configuração, haverá a predominância da corrente de excitação I_2 ,

¹ Henry Augustus Rowland (Novembro 27, 1848 – Abril 16, 1901) físico americano e o primeiro a presidir a sociedade americana de física.

medida indiretamente através da queda de tensão no resistor R_2 , a qual deve ser da ordem de poucos ohms e que admita circulação de correntes da ordem de 20 Ampères para a montagem em questão.

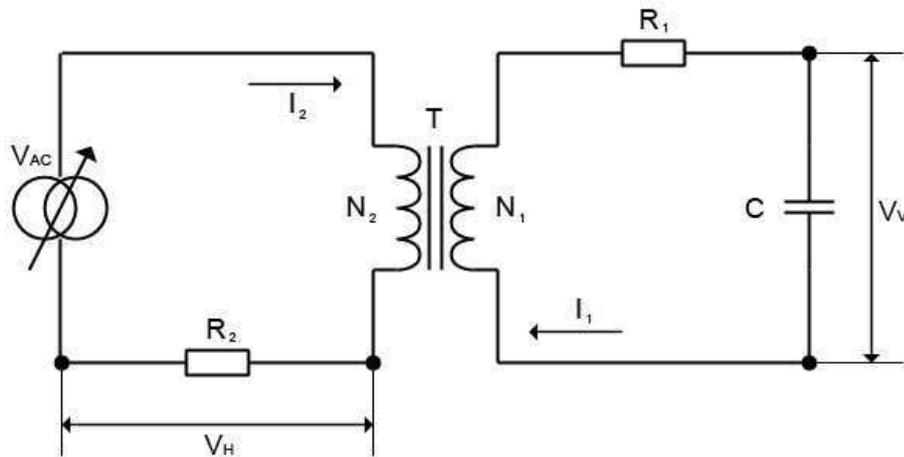


Figura 2.2: Diagrama sinótico do circuito de ensaio.

Como $i_\phi = I_2 = \frac{V_H}{R_2}$, o campo H , pode ser expresso, a partir da equação (2.4), como

$$H = \frac{N_2}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \cdot \frac{V_H}{R_2} = \frac{N_2}{l_m \cdot R_2} \cdot V_H \quad (2.6)$$

Onde $l_m = 2 \cdot \pi \cdot r_m$ é o comprimento médio do núcleo, dado em metros. A tensão induzida no secundário do anel de Rowland pode ser expressa como

$$e_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

e a corrente no secundário como

$$I_1 = \frac{e_1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2.8)$$

Os valores dos componentes R_1 e C devem ser escolhidos, de modo que a corrente no secundário possa ser aproximada por

$$I_1 \approx \frac{e_1}{R_1} \quad (2.9)$$

Tal aproximação é conseguida, escolhendo $R_1 \gg C$. Substituindo (2.7) em (2.9), temos

$$I_1 = \frac{N_1}{R_1} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.10)$$

segue que

$$I_1 \cdot dt = \frac{N_1}{R_1} \cdot d\phi \quad (2.11)$$

integrando a equação (2.11) no tempo, obtemos

$$\int I_1 \cdot dt = \int \frac{N_1}{R_1} \cdot d\phi \quad (2.12)$$

como $\int I_1 \cdot dt$ representa a carga armazenada no capacitor ($Q = CV$), de (2.12) temos

$$V_V C = \frac{N_1}{R_1} \cdot \phi \quad (2.13)$$

Sabendo que o fluxo $\phi = B \cdot A$, onde A é a área da seção reta do núcleo toroidal, temos finalmente

$$V_V C = \frac{N_1}{R_1} \cdot B \cdot A \quad (2.14)$$

rearranjando a equação (2.14), obtemos a expressão para o cálculo do fluxo magnético B em função da tensão V_V no capacitor

$$B = \frac{R_1 \cdot C}{N_1 \cdot A} \cdot V_V \quad (2.15)$$

As equações (2.6) e (2.15) podem, então, ser usadas para determinar as grandezas H e B , necessárias à determinação da curva de magnetização inicial do material ferromagnético.

2.2 A PLATAFORMA DE ENSAIO

Os ensaios para a determinação da característica $B-H$ dos materiais foram executados em uma plataforma desenvolvida de modo que os componentes e conexões utilizados no experimento pudessem ser inseridos de acordo com as necessidades da montagem. A plataforma de apoio foi construída segundo as dimensões mostradas na figura 2.3:

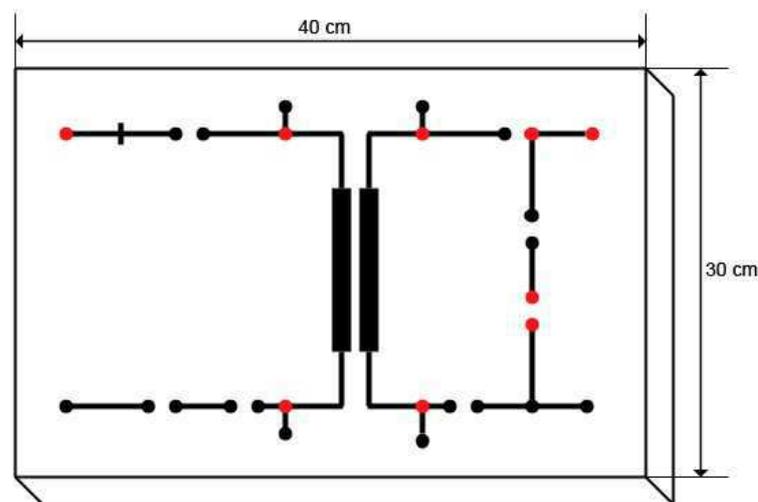


Figura 2.3: Diagrama da plataforma experimental.

- Comprimento $c = 40 \text{ cm}$;
- Largura $l = 30 \text{ cm}$;
- Altura $h = 5 \text{ cm}$;

Os componentes utilizados na plataforma foram:

- Resistor $R_1 = 98,8 \text{ k}\Omega$;

- Resistor $R_2 = 2,2 \Omega$;
- Capacitor $C = 2,17 \mu F$;

Os componentes estão dispostos conforme a configuração mostrada na figura 2.4. O resistor $R_2 = 2,2 \Omega$ deve suportar uma corrente máxima de 20 A.

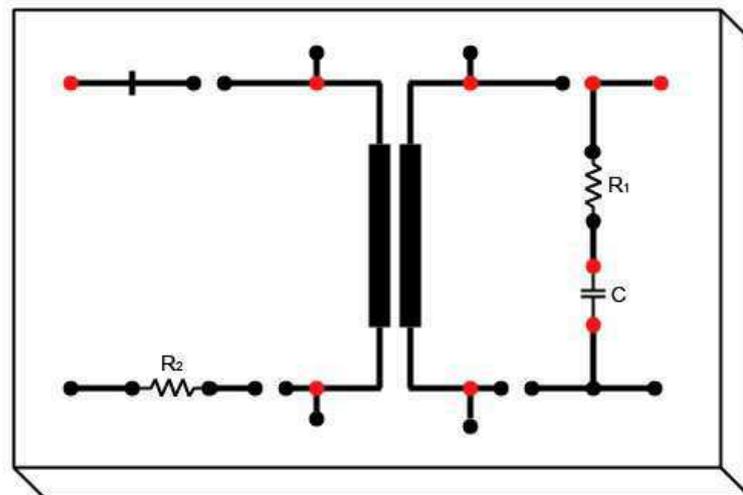


Figura 2.4: Diagrama da bancada experimental.

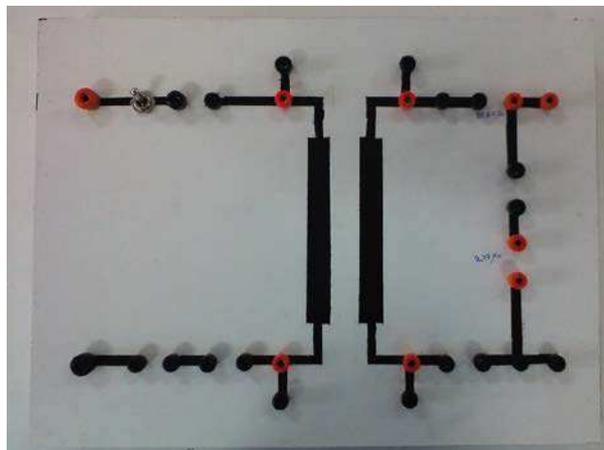


Figura 2.5: Bancada experimental.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 OBJETIVOS DO EXPERIMENTO

O alternador síncrono trifásico, como qualquer outra máquina elétrica, possui circuito magnético constituído por materiais ferromagnéticos, preferencialmente de baixas perdas. Qualquer discussão acerca das propriedades magnéticas de um material é passível de incluir um tipo de gráfico conhecido como curva de magnetização $B-H$. Alguns métodos podem ser usados para se determinar tal curva de grande importância no projeto de máquinas elétricas. Trabalhos significativos foram desenvolvidos anteriormente [7], [8], principalmente para estudo e análise de perdas em transformadores.

O experimento em pauta tem por objetivo a determinação da característica de magnetização de chapas de aço retiradas de dois alternadores, usados na geração de energia elétrica em usinas hidroelétricas, que foram submetidos ao processo de repotenciação, e de novas laminações utilizadas em substituição às antigas. As amostras foram processadas e transformadas em anéis de Rowland, conforme descrição a seguir.

3.2 MONTAGEM DOS ANÉIS DE ROWLAND

Três amostras de material ferromagnético, duas delas usadas em alternadores e uma usada na substituição, nomeadamente, amostra I, amostra II e amostra III, foram obtidas de duas unidades de geração hidroelétrica em processo de repotenciação. A fabricação dos anéis de Rowland foi efetuada nas dependências do Núcleo de Energia (NERG), onde todo o material foi processado.



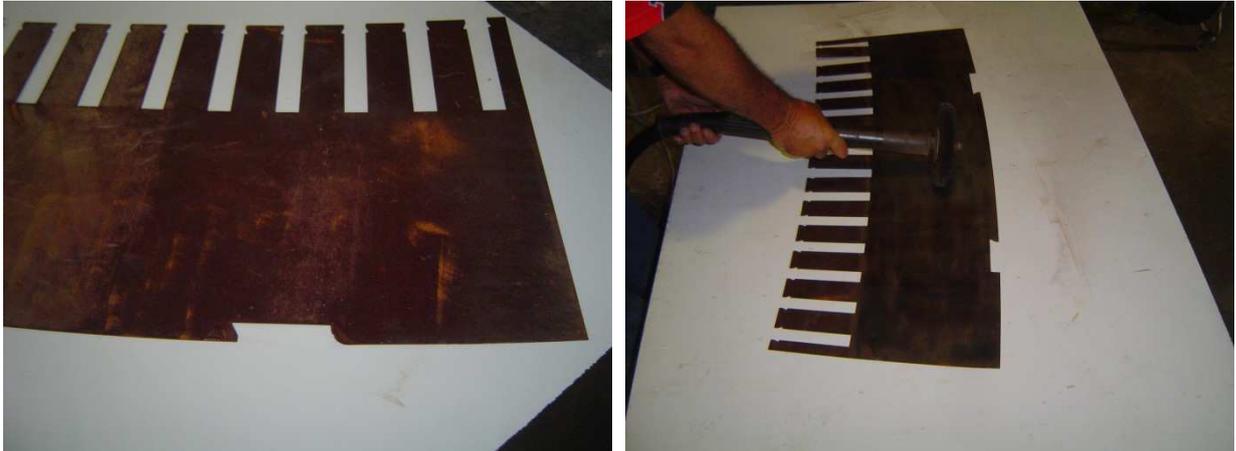
(a) Amostra I.



(b) Amostra II.

Figura 3.1: Chapas de aço de alternadores usados em UHE's.

A primeira etapa do processamento das amostras consistiu na remoção de resquícios de oxidação das mesmas usando uma escovadeira manual. Tal processo consiste em aplicar a máquina ferramenta sobre a superfície da chapa até que seja removido o excesso de ferrugem, decorrente do longo tempo de uso do material.



(a) Chapa de aço oxidada.

(b) Escovamento da chapa.

Figura 3.2: Processamento das chapas de aço.

Após a etapa de escovamento foi então aplicado verniz isolante e posteriormente, cortada em tiras finas, com 1,2 cm de largura.



(a) Chapa envernizada.

(b) Recortes em tiras.

Figura 3.3: Chapa de aço processada.

Após o recorte das chapas de aço em tiras, estas foram soldadas em suas extremidades de modo a se obter uma longa tira de aço, a qual foi enrolada na forma de um anel. O processo de soldagem foi efetuado usando-se um transformador para solda. As

extremidades destas fitas foram desbastadas e em seguida sobrepostas em 5 cm. Um pequeno pedaço de solda foi colocado entre as fitas e, então, foram prensadas no transformador de solda, que faz com que pela região de contato circule uma alta corrente o que causa o aquecimento até próximo do ponto de fusão do material que, estando em contato, se funde soldando permanentemente.



(a) Extremidade desbastada.



(b) Transformador de solda.

Figura 3.4: Soldagem das fitas de aço.

Após a construção de uma longa tira de dimensões pré-determinadas, a mesma é enrolada sob a forma de um anel. O material foi enrolado de modo que a altura de uma seção transversal do anel é duas vezes o valor da largura do mesmo.



(a)



(b)

Figura 3.5: Enrolamento das fitas de aço.

O molde utilizado para dar forma ao anel foi construído com diâmetro de 8,5 cm, sendo este comprimento o diâmetro interno do anel. O diâmetro externo é de 13,3 cm e suas dimensões de transversais são 2,4 cm de altura e 1,2 cm de largura conforme especificado na figura (3.6).

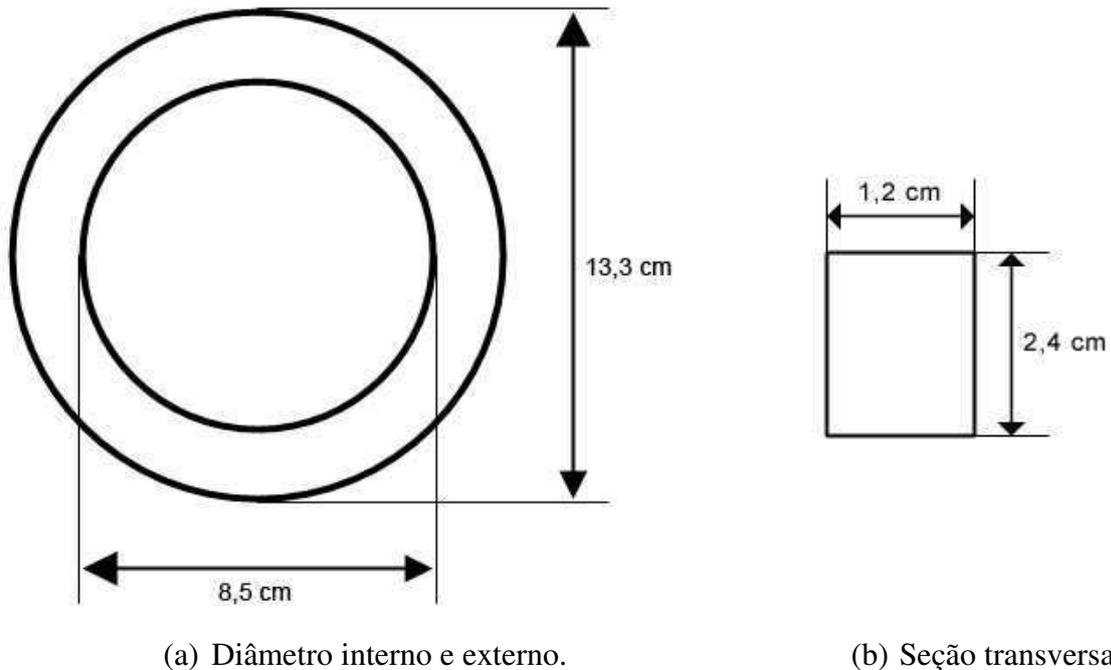


Figura 3.6: Dimensões do anel toroidal.

3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento consiste em levantar a característica $B-H$ do material ferromagnético. A determinação das grandezas B e H é realizada de forma indireta através da medição dos sinais de tensão e corrente. Os anéis foram enrolados com fio de cobre esmaltado AWG 28. Com o material obtido, foram então fabricados 3 anéis com as dimensões especificadas anteriormente. Dois destes anéis foram fabricados com material em uso contínuo há vários anos e um terceiro anel foi fabricado com amostras do material usado na repotenciação dos alternadores.

3.4 MONTAGEM DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Os seguintes instrumentos foram usados no experimento:

- 2 multímetros TRUE RMS;
- 1 multímetro digital;
- 1 variac 0-280 V (30 A);
- 4 Resistores de 2,2 ohms (10 A);
- 1 Bancada para montagem do circuito;

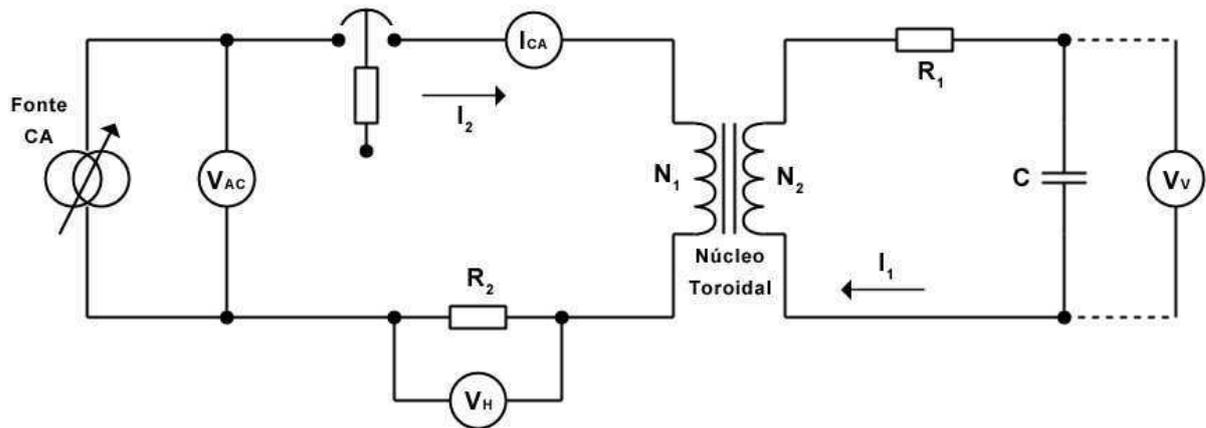


Figura 3.7: Diagrama sinótico da montagem experimental.

O circuito da montagem utilizada, montado em uma plataforma de madeira, é composto por um resistor de $98,8\text{ k}\Omega$, um capacitor de $2,17\ \mu\text{F}$ e conectores. A partir do circuito mostrado na figura (3.7), obteve-se valores de tensão no resistor R_2 , no capacitor C e da corrente I_2 no primário. Para levar o material ferromagnético à saturação, é necessário aplicar uma corrente de, até, aproximadamente 15 A no primário do anel toroidal. Desta forma, o resistor R_2 deve ser escolhido de forma que suporte tais níveis de corrente. Para a simulação, adotou-se uma associação série-paralelo de 4 resistores de potência de $R = 2,2\ \Omega$ resultando em uma resistência equivalente de $R_2 = 2,2\ \Omega$.

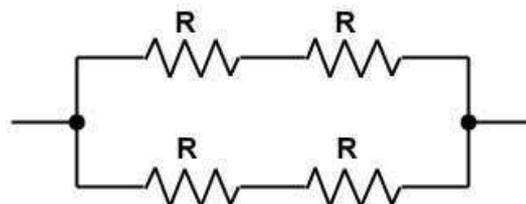


Figura 3.8: Associação de resistores.

Para medir os valores da tensão V_H e V_V , utilizou-se dois multímetros do tipo TRUE-RMS conectados sobre a resistência R_2 e sobre o capacitor C . Utilizando um multímetro digital para monitorar a corrente I_2 , aplicou-se então uma tensão no secundário e mediu-se os valores das tensões V_H e V_V em R_2 e C , respectivamente, para valores de corrente I_2 variando de 0,5 até 15 A em intervalos de 1 A.



(a) Associação de resistores

(b) Montagem da bancada

Figura 3.9: Plataforma experimental.

3.5 DADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO

Os três anéis de Rowland possuem a mesma relação de espira bem como as mesmas dimensões. Os ensaios foram executados com tensão gerada em $f = 60 \text{ Hz}$.

$$N_1 = 120 \text{ espiras}$$

$$N_2 = 240 \text{ espiras}$$

Antes de se iniciarem os ensaios, para cada anel foi aplicada uma tensão na bobina primária e verificou-se a tensão de saída na bobina secundária, com o objetivo de se verificar a relação de espiras.

- Amostra I

$$e_1 = 3,78 \text{ volt}$$

$$e_2 = 8,02 \text{ volt}$$

Tabela 1: Dados experimentais – Amostra I

#	I (A)	V_H (v)	V_V (v)
1	0,54	1,18	59,68
2	1,05	2,37	81,14
3	2,15	5,05	106,40
4	2,98	7,12	118,00
5	3,97	9,60	127,90
6	5,17	12,58	137,00
7	5,99	14,55	141,88
8	7,28	17,70	148,67
9	8,21	19,89	152,69
10	9,13	22,02	156,48
11	10,06	24,14	159,82
12	11,15	26,70	163,65
13	12,13	28,86	166,57
14	13,15	31,20	169,64
15	14,20	33,59	172,49
16	15,31	35,99	175,30

- Amostra II

$e_1 = 4,26$ volt

$e_2 = 9,61$ volt

Tabela 2: Dados experimentais – Amostra II

#	I (A)	V_H (v)	V_V (v)
1	0,53	1,22	65,93
2	1,11	2,67	87,33
3	2,08	5,07	108,00
4	3,09	7,51	122,68
5	4,06	9,86	133,26
6	5,08	12,37	141,90
7	6,17	15,05	148,92
8	7,01	17,02	153,32
9	8,24	19,96	159,10
10	9,20	22,35	163,05
11	10,21	24,72	166,63
12	11,24	27,13	169,96
13	12,16	29,25	172,44
14	13,17	31,55	175,49
15	14,02	33,46	177,50
16	15,12	35,71	179,90

- Amostra III

$$e_1 = 5,04 \text{ volt}$$

$$e_2 = 10,05 \text{ volt}$$

Tabela 3: Dados experimentais – Amostra III

#	I (A)	V_H (v)	V_V (v)
1	0,52	1,25	73,7
2	1,07	2,58	98,6
3	2,03	4,94	124,4
4	3,02	7,35	143,2
5	4,03	9,74	158,6
6	5,02	12,15	170,5
7	6,03	14,59	180,2
8	7,14	17,32	188,6
9	8,18	19,82	195,1
10	9,14	22,23	200,2
11	10,17	24,66	205,2
12	11,20	27,08	209,8
13	12,25	29,48	213,6
14	13,24	31,76	217,2
15	14,22	34,01	220,3
16	15,21	36,28	223,5

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

$$N_1 = 240 \text{ espiras}$$

$$N_2 = 120 \text{ espiras}$$

Área da seção transversal A do núcleo:

$$A = (1,2 \times 2,4) = 2,88 \text{ cm}^2 = 0,000288 \text{ m}^2$$

Comprimento médio l_m do núcleo:

$$r_i = \frac{8,5}{2} = 4,25 \text{ cm} = 0,0425 \text{ m}$$

$$r_e = \frac{13,5}{2} = 6,75 \text{ cm} = 0,0675 \text{ m}$$

$$r_m = 0,0675 - \left(\frac{0,0675 - 0,0425}{2} \right) = 0,055 \text{ m}$$

$$l_m = 2 \cdot \pi \cdot r_m = 2 \cdot \pi \cdot 0,055 = 0,3456 \text{ m}$$

Uma vez que foram obtidos os valores de tensão V_H e V_V , pôde-se calcular o campo H e o fluxo magnético B para, então, plotar em um gráfico a curva $H \times B(H)$. Das equações (2.6) e (2.15), temos

$$H = \frac{N_2}{l_m \cdot R_2} \cdot V_H = \frac{240}{0,3456 \cdot 2,2} \cdot V_H = 315,65657 \cdot V_H \quad (3.1)$$

$$B = \frac{R_1 \cdot C}{N_1 \cdot A} \cdot V_V = \frac{98,8 \times 10^3 \cdot 2,17 \times 10^{-6}}{120 \cdot 2,88 \times 10^{-4}} = 6,00347 \cdot V_V \quad (3.2)$$

Após a obtenção dos dados em laboratório um programa foi escrito em MATLAB¹ de modo a automatizar e melhorar a precisão dos cálculos. Os dados foram plotados e obtiveram-se os gráficos dados a seguir.

- Amostra I

Tabela 4: Valores de campo e fluxo – Amostra I

#	I_2 (A)	H (Aesp/m)	B (T)
1	0,54	373	0,3702
2	1,05	748	0,5034
3	2,15	1594	0,6601
4	2,98	2248	0,7320
5	3,97	3031	0,7934
6	5,17	3971	0,8499
7	5,99	4593	0,8802
8	7,28	5588	0,9223
9	8,21	6279	0,9472
10	9,13	6951	0,9707
11	10,06	7620	0,9915
12	11,15	8429	1,0152
13	12,13	9111	1,0333
14	13,15	9849	1,0536
15	14,20	10604	1,0701
16	15,31	11361	1,0875

Plotando estes valores em um gráfico $B(H) \times H$, obtemos a característica de magnetização para a amostra de material ferromagnético n. I. Uma análise do gráfico obtido, podemos verificar que entre 0 e 0,5 T, μ é constante e a relação $B - H$ pode ser considerada como sendo uma região linear. Entre 0,5 e 0,85 T caracteriza o "joelho" da curva, ou o maior valor de B anterior à saturação. Este ponto é bastante utilizado no projeto de máquinas

¹ MATLAB – MaTriX LaBoratory – copyright © MathWorks Inc.

elétricas. A região na qual o fluxo magnético B é maior que 0,85 T caracteriza a região de saturação, onde um grande aumento de H praticamente não causa variação em B .

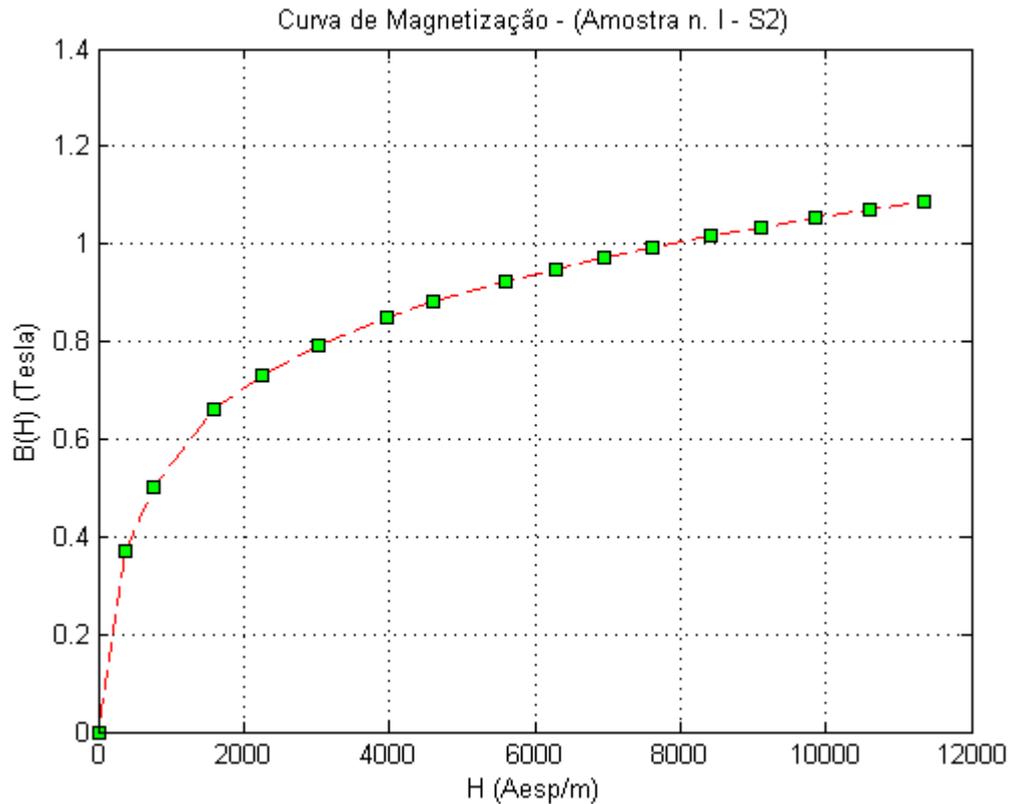


Figura 3.10: Curva de magnetização – Amostra I.

- Amostra II

Tabela 5: Valores de campo e fluxo – Amostra II

#	I_2 (A)	H (Aesp/m)	B (T)
1	0,53	385	0,4090
2	1,11	843	0,5418
3	2,08	1600	0,6700
4	3,09	2371	0,7611
5	4,06	3113	0,8267
6	5,08	3905	0,8803
7	6,17	4751	0,9237
8	7,01	5373	0,9511
9	8,24	6301	0,9870
10	9,20	7055	1,0115
11	10,21	7804	1,0337
12	11,24	8564	1,0544
13	12,16	9234	1,0697
14	13,17	9960	1,0887
15	14,02	10563	1,1011
16	15,12	11273	1,1160

Plotando estes valores em um gráfico $B(H) \times H$, obtemos a característica de magnetização para a amostra de material ferromagnético II. Uma análise do gráfico obtido, podemos verificar que entre 0 e 0,5 T, μ é constante e a relação $B - H$ pode ser considerada como sendo uma região linear. Entre 0,5 e 0,80 T caracteriza o "joelho" da curva, ou o maior valor de B anterior à saturação. A região na qual o fluxo magnético B é maior que 0,80 T caracteriza a região de tendência à saturação, onde um grande aumento de H praticamente não causa variação em B . Assim como o material da amostra I, este material apresenta um fluxo magnético útil, máximo, da ordem de 0,8 T, a partir do qual se faz necessário um alto valor de corrente de excitação para que se consiga um aumento significativo no fluxo magnético.

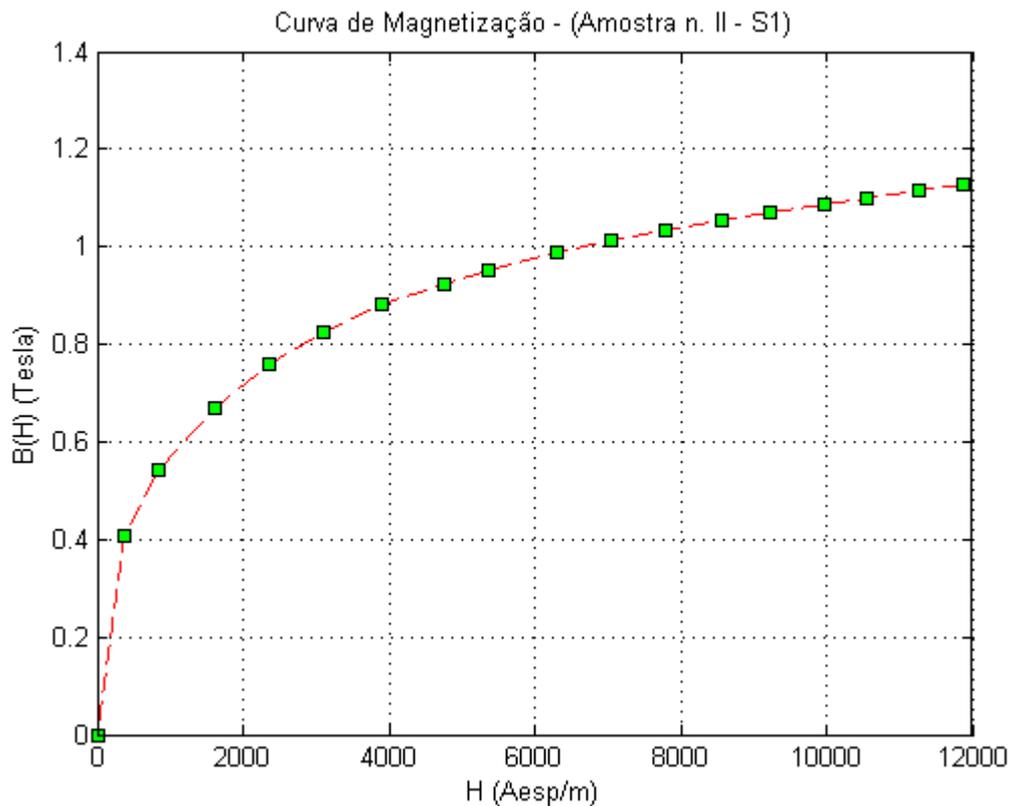


Figura 3.11: Curva de magnetização – Amostra II.

- Amostra III

Tabela 6: Valores de campo e fluxo – Amostra III

#	I_2 (A)	H (A esp/m)	B (T)
1	0,52	395	0,4572
2	1,07	814	0,6117
3	2,03	1559	0,7717
4	3,02	2320	0,8884
5	4,03	3075	0,9839
6	5,02	3836	1,0577
7	6,03	4606	1,1179
8	7,14	5468	1,1700
9	8,18	6257	1,2103
10	9,14	7018	1,2420
11	10,17	7785	1,2730
12	11,20	8549	1,3015
13	12,25	9306	1,3251
14	13,24	10026	1,3474
15	14,22	10736	1,3667
16	15,21	11453	1,3865

Plotando estes valores em um gráfico $B(H) \times H$, obtemos a característica de magnetização para a amostra de material ferromagnético III. Uma análise do gráfico obtido, podemos verificar que entre 0 e 0,6 T, μ é constante e a relação $B - H$ pode ser considerada como sendo uma região linear. Entre 0,6 e 1,20 T caracteriza o "joelho" da curva, ou o maior valor de B anterior à saturação. A região na qual o fluxo magnético B é maior que 1,2 T caracteriza a região de saturação, onde um grande aumento de H praticamente não causa variação em B .

Diferentemente dos materiais das amostras I e II, este material apresenta uma boa indução magnética visto que seu ponto de operação se situa em uma região de aproximadamente 0,6 T, ou seja, o dobro dos materiais anteriormente analisados. A completude da saturação e da facilidade com que se aproxima desta região depende do material e, em particular, dos elementos que são misturados com o ferro e do tratamento físico durante seu processo de fabricação. O material da amostra III mostra-se um material de excelente qualidade, aumentando o fluxo máximo induzido para um mesmo valor de excitação.

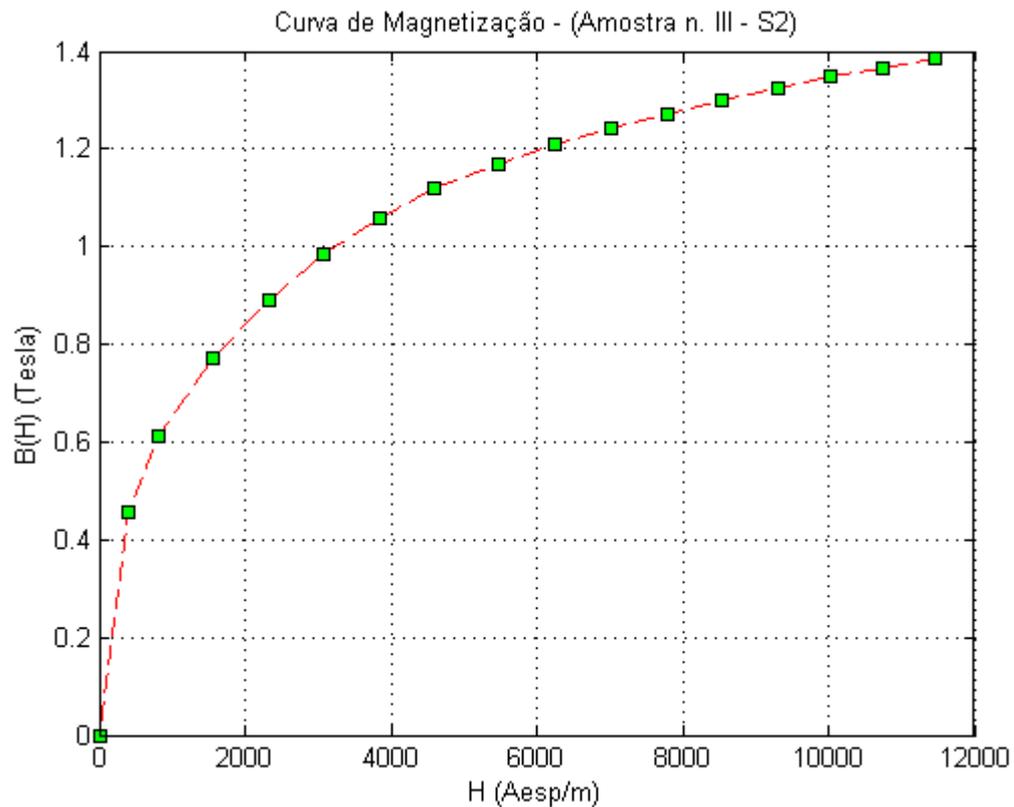


Figura 3.12: Curva de magnetização – Amostra III.

3.7 AJUSTE DE CURVAS

Os pontos obtidos anteriormente foram ajustados no software MATLAB, através da toolbox Curve Fitting Tool. Esta interface fornece um conjunto de ferramentas gráficas e funções de linha de comando para ajuste de curvas e superfícies aos dados. A caixa de ferramentas permite que seja executada a análise exploratória, pré-processamento e pós-processamento de dados, comparar modelos candidatos e remover valores discrepantes. Pode-se realizar a análise de regressão usando a biblioteca de modelos lineares e não-lineares previstos ou especificar equações personalizadas. A biblioteca fornece parâmetros solver otimizados e condições iniciais para melhorar a qualidade dos ajustes. A caixa de ferramentas também suporta técnicas de modelagem não-paramétricas, tais como splines, interpolação e alisamento (smoothing). Depois de criar um ajuste, pode-se aplicar uma variedade de métodos de pós-processamento para plotagem, interpolação e extrapolação, estimar intervalos de confiança e cálculo de integrais e derivadas.

O ajuste dos pontos da curva é necessário para se estabelecer uma relação matemática que possibilite o cálculo do valor máximo da indução magnética B , no material, em função da máxima intensidade de campo H , suportável pelo mesmo, além de possibilitar

a determinação de pontos intermediários da curva de magnetização, útil na determinação do ponto de operação ideal.

- Ajuste dos pontos da amostra I

Uma primeira tentativa de ajustar os pontos da amostra I foi feita para a equação $y(x) = p_1x^2 + p_2x + p_3$, um polinômio de segundo grau. Ajustando esta equação aos pontos da tabela 4, obteve-se os coeficientes

$$p_1 = -9,77 \times 10^{-9}$$

$$p_2 = 1,752 \times 10^{-4}$$

$$p_3 = 0,2812$$

com precisão do ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,8961 \text{ (89,61\%)}$$

logo, a curva pode ser extrapolada com precisão de 89,61% através da equação

$$y(x) = -9,77 \times 10^{-9} x^2 + 1,752 \times 10^{-4} x + 0,2812$$

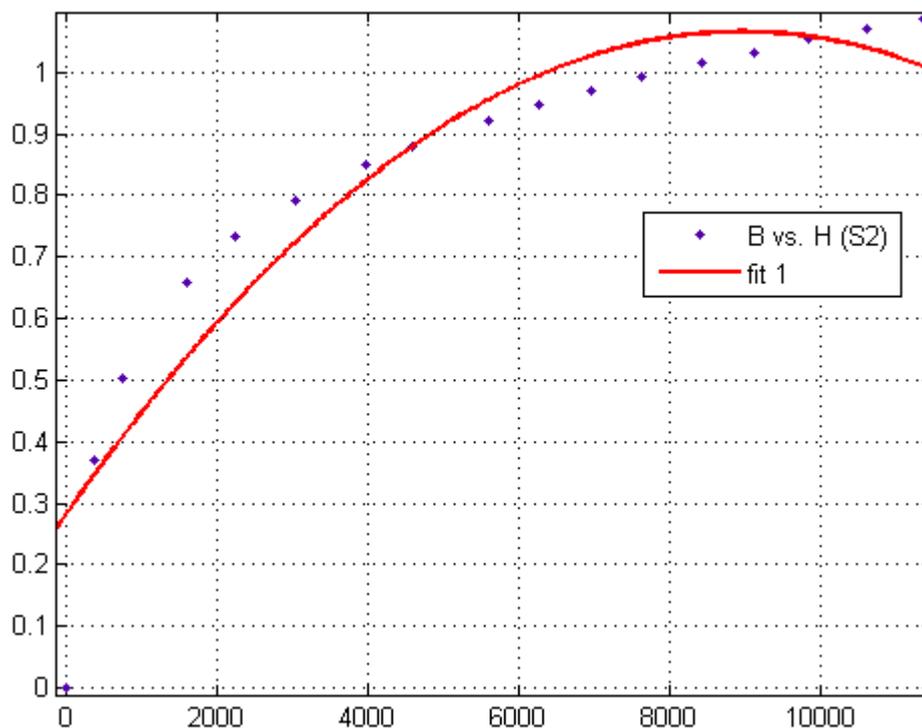


Figura 3.13: Curva de magnetização – Amostra I.

Ajustando agora os pontos da amostra I à equação $y(x) = \frac{a \cdot x}{b + x}$, também conhecida como equação de Fröhlich, obteve-se os coeficientes

$$a = 1,137 \text{ (1.088, 1.185)}$$

$$b = 1098 \text{ (864.7, 1331)}$$

com precisão do ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,9843 \text{ (98,43\%)}$$

logo, a curva pode ser extrapolada com precisão de 98,43% através da equação

$$y(x) = \frac{1,137 \cdot x}{1098 + x} \quad (3.3)$$

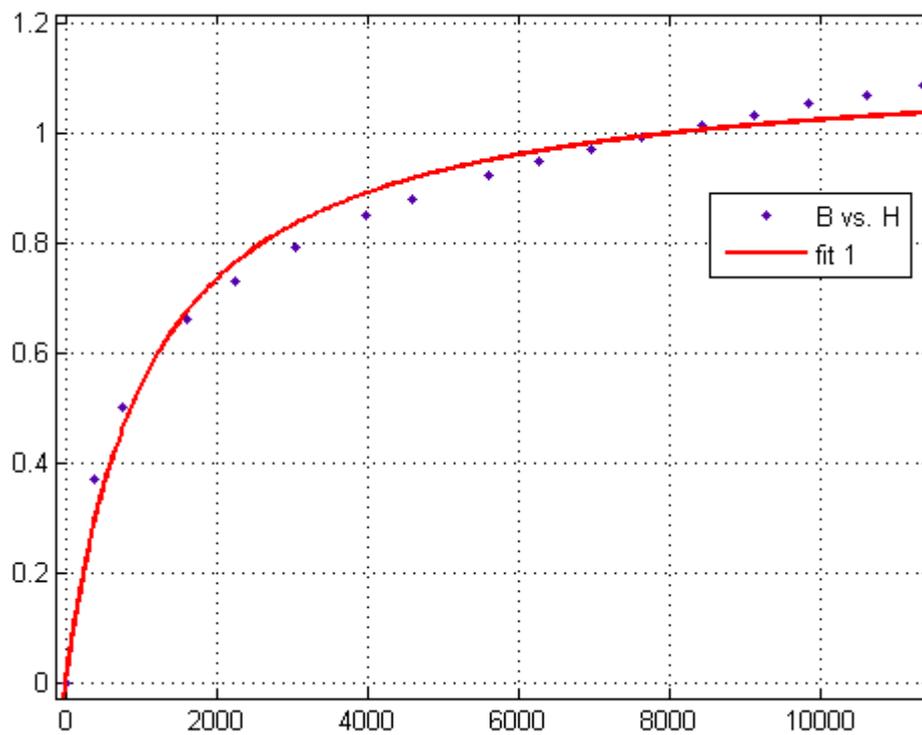


Figura 3.14: Curva de magnetização – Amostra I.

Buscando o ajuste dos pontos da tabela 4 à expressão $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x^c))$, obtiveram-se os coeficientes

$$a = 1.333 \text{ (1.245, 1.42)}$$

$$b = 0.02181 (0.01865, 0.02496)$$

$$c = 0.4638 (0.4332, 0.4944)$$

com precisão de ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,9995 (99,95 \%)$$

logo a curva pode ser extrapolada, com precisão de 99,95 % através da equação

$$y(x) = 1,333 \cdot (1 - \exp(-0,02181 \cdot x^{0,4638})) \quad (3.4)$$

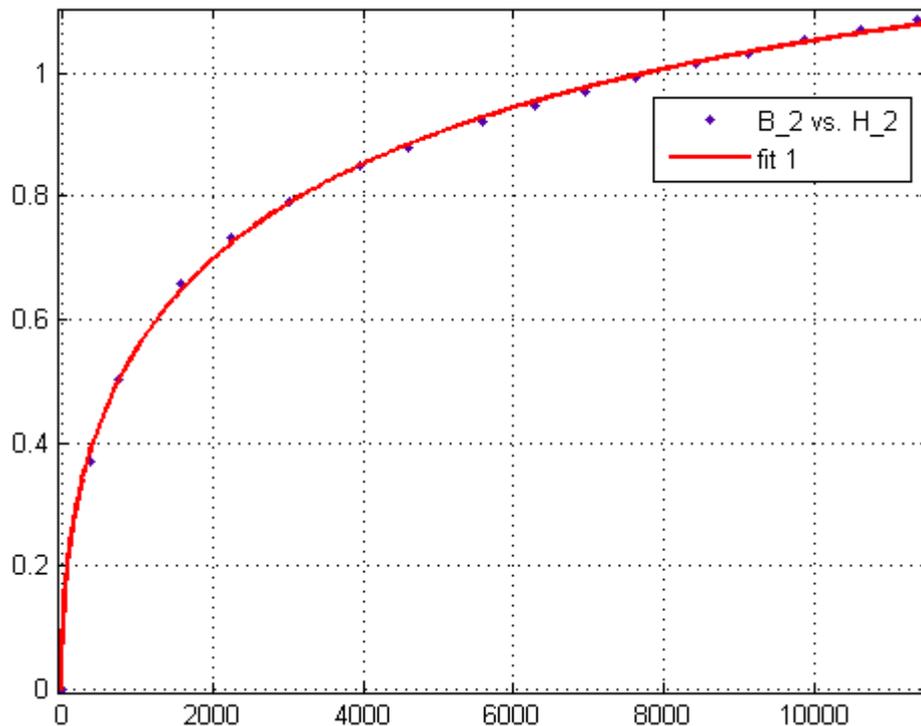


Figura 3.15: Curva de magnetização – Amostra I

- Ajuste dos pontos da amostra II

Ajustando os pontos da amostra II à equação $y(x) = p_1x^2 + p_2x + p_3$, obteve-se os coeficientes

$$p_1 = -9,427 \times 10^{-9}$$

$$p_2 = 1,753 \times 10^{-4}$$

$$p_3 = 0,2993$$

com precisão de ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,898 \text{ (89,8\%)}$$

logo, a curva pode ser extrapolada com precisão de 89,8% através da equação

$$y(x) = -9,427 \times 10^{-8} x + 1,753 \times 10^{-4} x + 0,2993$$

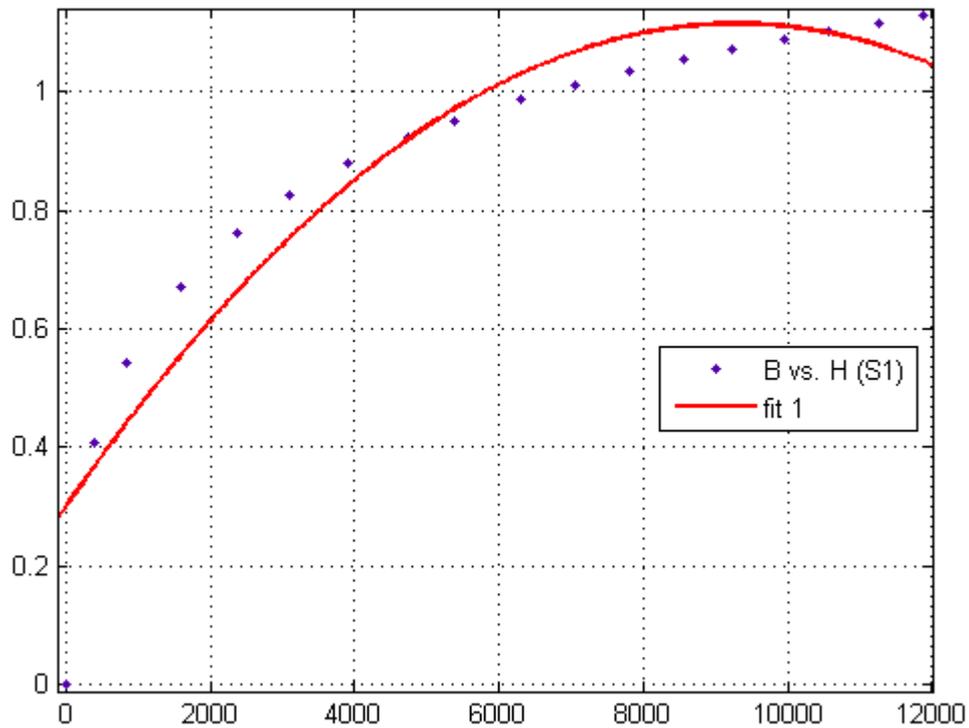


Figura 3.16: Curva de magnetização – Amostra II.

Ajustando a equação de Fröhlich aos pontos da tabela 5, obtiveram-se os coeficientes a e b, calculados no MATLAB

$$a = 1,189 \text{ (1.139, 1.239)}$$

$$b = 1146 \text{ (902, 1389)}$$

com precisão de ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,9825 \text{ (98,25\%)}$$

logo, a curva pode ser extrapolada com precisão de 98,25% através da equação

$$y(x) = \frac{1,189 \cdot x}{1146 + x} \quad (3.5)$$

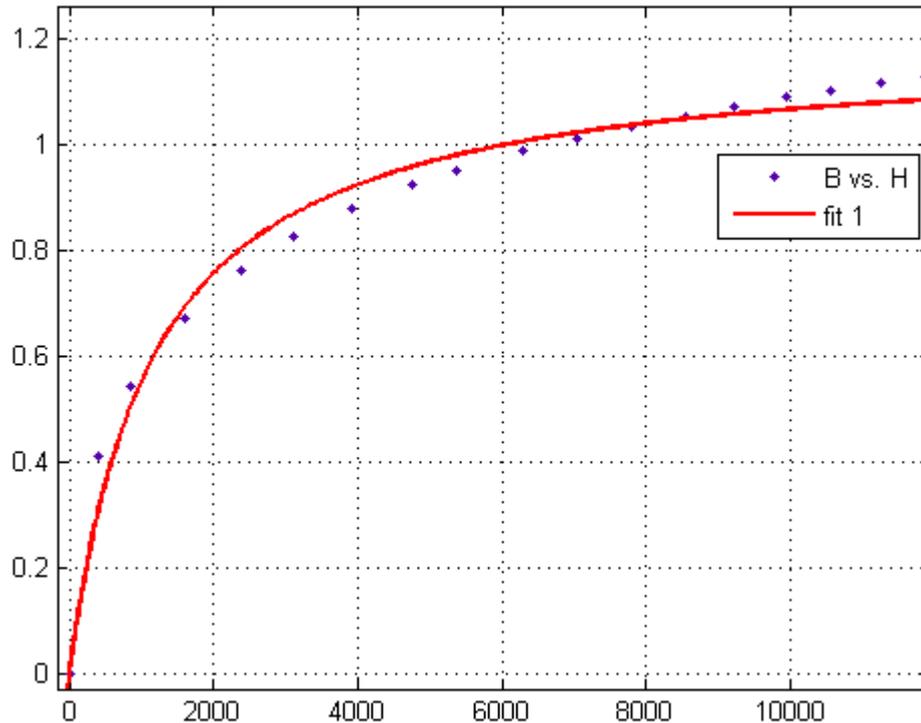


Figura 3.17: Curva de magnetização – Amostra II

Ajustando agora os pontos da tabela 5 à expressão $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x^c))$, obtiveram-se os coeficientes

$$a = 1.4 \text{ (1.372, 1.428)}$$

$$b = 0.02313 \text{ (0.02213, 0.02412)}$$

$$c = 0.4535 \text{ (0.4443, 0.4626)}$$

com precisão do ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,9999 \text{ (99,99 \%)}$$

logo a curva pode ser extrapolada, com precisão de 99,99 % através da equação

$$y(x) = 1,4 \cdot (1 - \exp(-0,02313 \cdot x^{0,4535})) \quad (3.6)$$

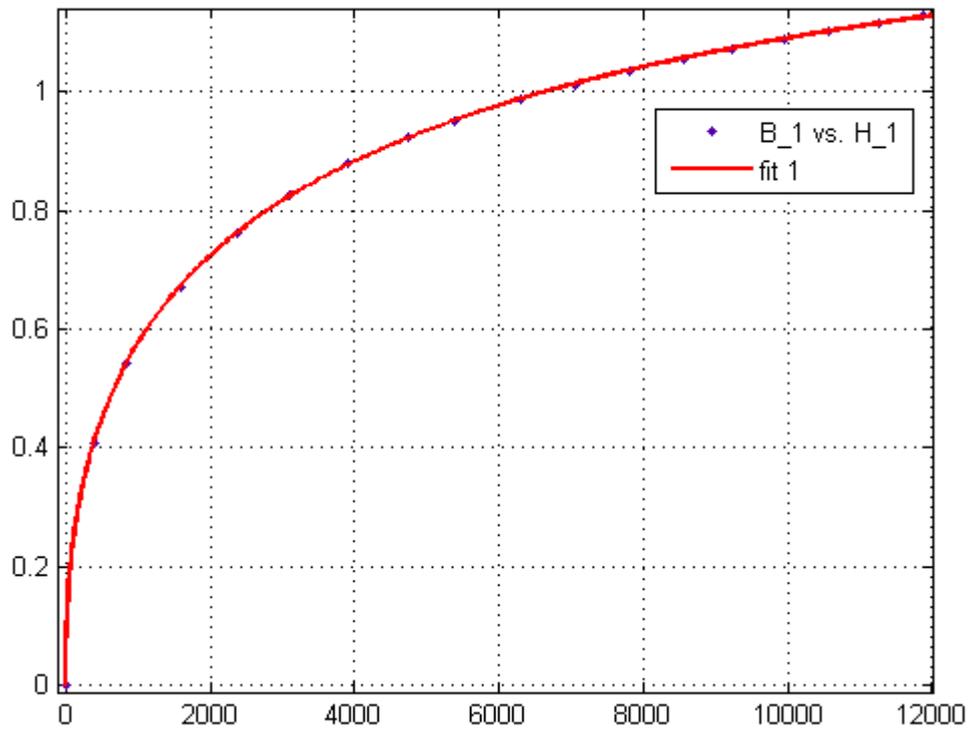


Figura 3.18: Curva de magnetização – Amostra II

- Ajuste dos pontos da amostra III

Ajustando os pontos da amostra III à equação $y(x) = p_1x^2 + p_2x + p_3$, um polinômio de segundo grau, obteve-se os coeficientes

$$p_1 = 1,268 \times 10^{-8}$$

$$p_2 = 2,294 \times 10^{-4}$$

$$p_3 = 0,3254$$

com precisão do ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,9193 \text{ (91,93\%)}$$

logo, a curva pode ser extrapolada com precisão de 91,93% através da equação

$$y(x) = 1,268 \times 10^{-8} x^2 + 2,294 \times 10^{-4} x + 0,3254$$

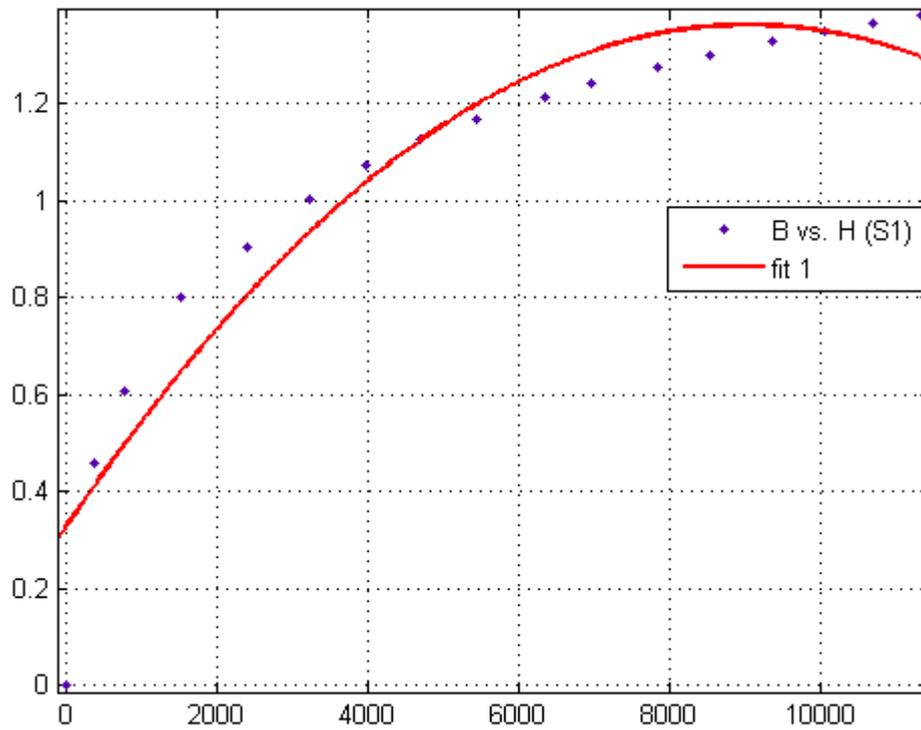


Figura 3.19: Curva de magnetização – Amostra III.

Ajustando a equação de Fröhlich aos pontos da tabela 6, obtiveram-se os coeficientes

$$a = 1.501 \text{ (1.432, 1.57)}$$

$$b = 1393 \text{ (1108, 1677)}$$

com precisão do ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,9854 \text{ (98,54\%)}$$

logo, a curva pode ser extrapolada com precisão de 98,54% através da equação

$$y(x) = \frac{1,501 \cdot x}{1393 + x} \quad (3.7)$$

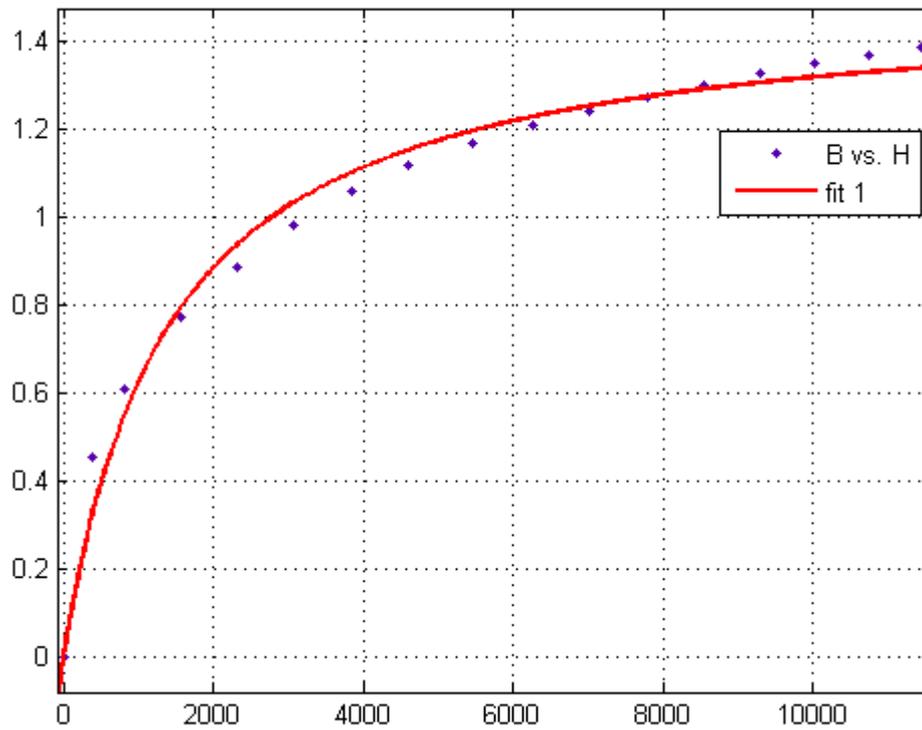


Figura 3.20: Curva de magnetização – Amostra III

Ajustando agora os pontos da tabela 6 à expressão $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x^c))$, obtiveram-se os coeficientes

$$a = 1.725 \text{ (1.669, 1.781)}$$

$$b = 0.01545 \text{ (0.01426, 0.01663)}$$

$$c = 0.4983 \text{ (0.4828, 0.5138)}$$

com precisão do ajuste (coeficiente de determinação) da ordem de

$$R^2 = 0,9999 \text{ (99,99 \%)}$$

logo a curva pode ser extrapolada, com precisão de 99,99 % através da equação

$$y(x) = 1,725 \cdot (1 - \exp(-0,01545 \cdot x^{0,4983})) \quad (3.8)$$

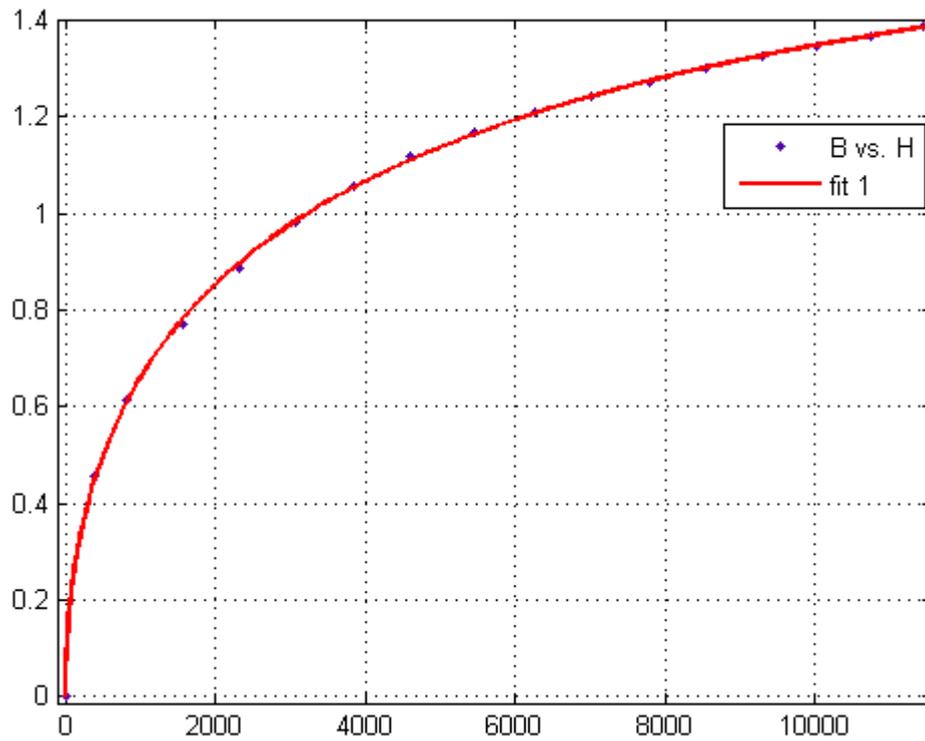


Figura 3.21: Curva de magnetização – Amostra III

Plotando agora as três curvas obtidas anteriormente, podemos ter uma estimativa da qualidade do material novo, empregado em substituição aos antigos no processo de repotenciação.

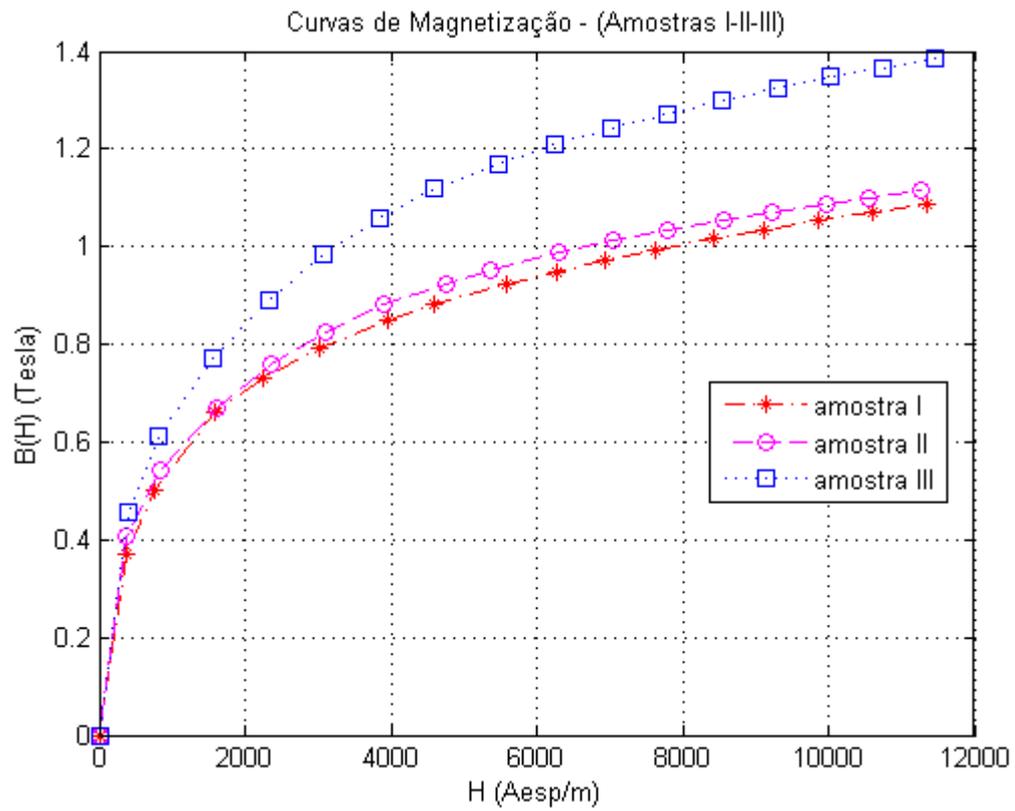


Figura 3.22: Curva de magnetização – Amostras I-II-III

O diagrama da figura 3.22 evidencia a qualidade do material empregado na repotenciação dos alternadores. Observa-se, claramente, que para uma mesma excitação a densidade de fluxo é significativamente superior para a laminação substituta (amostra III).

4 CONCLUSÃO

A determinação da característica de magnetização de materiais ferromagnéticos, sobretudo os usados na construção de equipamentos elétricos, é importante pois fornece uma visão da qualidade do material empregado. O emprego de materiais de boa qualidade ajuda a reduzir perdas, aumentando a eficiência e melhorando o tempo de vida útil do equipamento. Atualmente têm-se empregado em usinas hidroelétricas, sobretudo nas mais antigas, o processo de repotenciação que consiste em revitalizar as máquinas geradoras (alternadores) substituindo os materiais empregados no estator e rotor, desgastados pelo longo tempo de uso contínuo, por materiais mais novos com baixo nível de perdas. Com isto consegue-se aumentar a potência instalada das unidades geradoras sem intervir na estrutura física da própria usina o que implica uma redução significativa de custos e minimização de impactos ambientais.

Estes trabalho teve por objetivo o levantamento da característica de magnetização ou curva $B-H$ de chapas de aço usadas nos alternadores de duas unidades de geração de hidroeletricidade. Devido ao longo tempo de uso destas unidades geradoras e à necessidade de um aumento na oferta de energia gerada, efetuou-se a repotenciação destas unidades. Não foi localizada na documentação original dos motores (fabricados nos anos 50) estas curvas de magnetização do material empregado na fabricação dos mesmos, fazendo-se necessária o levantamento destas características para efeito de comparação com o novo material empregado nestas máquinas.

O experimento executado, descrito neste trabalho, mostrou-se bastante simples e com resultados satisfatórios. Uma plataforma foi fabricada e encontra-se disponível no laboratório NERG para futuros experimentos. Os resultados obtidos para as amostras I e II evidenciam um material com qualidade limitada visto que a indução magnética máxima chega a aproximadamente 1,1 Tesla já na região de saturação do material. Atualmente existem dois tipos comuns de aço elétrico que são¹

- Aços elétricos de grão orientado (AGO) – Tem como principais aplicações a fabricação dos núcleos de transformadores, reatores de potência, hidrogeradores e turbogeradores;

¹ Catálogo APERAM – Aços Elétricos de Grão Orientado e de Grãos Não-Orientados (ACESITA)

- Aços elétricos de grão não-orientado (AGNO) – Tem como principais aplicações os geradores de usinas hidrelétricas, motores elétricos, reatores de lâmpadas fluorescentes e compressores herméticos para geladeiras, freezers e ar-condicionado.

Estes aços elétricos são um resultado de estudos e da evolução da ciência dos materiais e apresentam suas propriedades magnéticas plenamente desenvolvidas. Possuem excelente valor de permeabilidade e baixas perdas magnéticas. O novo material empregado no processo de repotenciação (amostra III) apresenta um alto valor de indução magnética, comparado com os materiais substituídos, características típicas de materiais com novas tecnologias. Com o emprego destes materiais em substituição aos antigos, obteve-se um ganho na potência total gerada às custas tanto da diminuição de perdas no ferro como pelo aumento da permeabilidade magnética visto que consegue-se uma indução maior para um mesmo valor de excitação. A repotenciação mostra-se portanto uma solução viável tecnicamente tendo em vista a disponibilidade de novas tecnologias e materiais de boa qualidade em substituição aos anteriormente utilizados, como forma de estender a vida útil destas unidades.

BIBLIOGRAFIA

- [1] OLIVEIRA, G. F. S., Cálculo de perdas magnéticas em torres de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada. TCC-UFRJ, Fevereiro/2011;
- [2] ANDRICH, et. al., Aquisição e processamento numérico do laço de histerese magnética. Programa especial de treinamento – PET, DEE-UFSC;
- [3] MARCELINO, G. V., Análise e medições das sobrecorrentes de energização de um transformador monofásico. TCC – UFRJ, Janeiro/ 2011;
- [4] LÜDKE, E., Estudando campos magnéticos e histerese com um anel de Rowland. Revista Brasileira do ensino de física, v 32, n. 1, 1504. DEE – UFSM, 2010;
- [5] SLEMON, G. R., Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas. Rio de Janeiro: LTC, 2010;
- [6] HALLIDAY, D., et. al., Fundamentos de física, vol. 3: eletromagnetismo. Rio de Janeiro: LTC, 2009;
- [7] LUCIANO, B. A., Estudo de Aplicações da liga FeSi Amorfa em Núcleos de Transformadores de Baixa Potência. UFCG. Tese de doutorado, Ano de obtenção: 1995.
- [8] GUERRA, F. C. F., Modelos de transformador de corrente para estudos em baixas frequências. UFCG. Tese de doutorado, Ano de obtenção: 2007;

ANEXOS

Código fonte utilizado no processamento dos dados obtidos em laboratório.

- Programa para cálculo do $B - H$

```

%-----%
% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA - CEEI
% DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE
% LABORATÓRIO DE MÁQUINAS ELEÉTRICAS
%
% Curva de Magnetização B-H
% Aluno: Ericson Norberto A. Santos
%-----%
clc
close all
clear all

% Parâmetros do circuito de simulação
R1 = 98.8e3;          % ohms
R2 = 2.2;            % ohms
C = 2.17e-6;         % uFarad

% Parâmetros do anel de Rowland
di = 8.5/100;        % Diâmetro interno (m)
de = 13.5/100;       % Diâmetro externo (m)
ri = di/2;           % Raio interno (m)
re = de/2;           % Raio externo (m)
l = 1.2/100;         % Largura da seção reta (m)
h = 2.4/100;         % Altura da seção reta (m)
A = (l*h);           % Área da seção reta (m2)
rm = re - ((re-ri)/2); % Raio médio (m)
lm = 2*pi*rm;        % Comprimento médio do núcleo (m)
N1 = 120;            % Espiras primário
N2 = 240;            % Espiras secundário

% Tensões medidas (obs: dimensão de Vr = dimensão de Vc)
% Pontos da Amostra n. I (S2)
Vh_1 = [0 1.18 2.37 5.05 7.12 9.60 12.58 14.55 17.70 19.89 22.02 24.14 26.70 28.86
31.20 33.59 35.99];
Vv_1 = [0 59.68 81.14 106.40 118.0 127.90 137.0 141.88 148.67 152.69 156.48 159.82
163.65 166.57 169.84 172.49 175.30]*1e-3;

% Pontos da Amostra n. II (S1)
Vh_2 = [0 1.22 2.67 5.07 7.51 9.86 12.37 15.05 17.02 19.96 22.35 24.72 27.13 29.25
31.55 33.46 35.71 37.65];
Vv_2 = [0 65.93 87.33 108.0 122.68 133.26 141.90 148.90 153.32 159.10 163.05 166.63
169.96 172.44 175.49 177.50 179.90 181.97]*1e-3;

% Pontos da Amostra n. III (S2)
Vh_3 = [0 1.25 2.58 4.94 7.35 9.74 12.15 14.59 17.32 19.82 22.23 24.66 27.08 29.48
31.76 34.01 36.28];
Vv_3 = [0 73.7 98.6 124.4 143.2 158.6 170.5 180.2 188.6 195.1 200.2 205.2 209.8
213.6 217.2 220.3 223.5]*1e-3;

% Cálculo das matrizes B e H - Amostra n. I (S2)
B_1 = [];
H_1 = [];
[~, n] = size(Vh_1);
for k=1:n
    H_1(1, k) = (N2/(lm*R2))*Vh_1(k);
    B_1(1, k) = ((R1*C)/(N1*A))*Vv_1(k);
end

% Cálculo das matrizes B e H - Amostra n. II (S1)

```

```

B_2 = [];
H_2 = [];
[~, n] = size(Vh_2);
for k=1:n
    H_2(1, k) = (N2/(lm*R2))*Vh_2(k);
    B_2(1, k) = ((R1*C)/(N1*A))*Vv_2(k);
end

% Cálculo das matrizes B e H - Amostra n. III (S2)
B_3 = [];
H_3 = [];
[~, n] = size(Vh_3);
for k=1:n
    H_3(1, k) = (N2/(lm*R2))*Vh_3(k);
    B_3(1, k) = ((R1*C)/(N1*A))*Vv_3(k);
end

% Gráficos -----
% Amostra n. I
figure(1)
plot(H_1, B_1, '--rs','LineWidth', 1, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor',
'g', 'MarkerSize', 5), xlabel('H (Aesp/m)'), ylabel('B(H) (Tesla)'), title('Curva
de Magnetização - (Amostra n. I - S2)'), grid

% Amostra n. II
figure(2);
plot(H_2, B_2, '--rs','LineWidth', 1, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor',
'g', 'MarkerSize', 5), xlabel('H (Aesp/m)'), ylabel('B(H) (Tesla)'), title('Curva
de Magnetização - (Amostra n. II - S1)'), grid

% Amostra n. III
figure(3);
plot(H_3, B_3, '--rs','LineWidth', 1, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor',
'g', 'MarkerSize', 5), xlabel('H (Aesp/m)'), ylabel('B(H) (Tesla)'), title('Curva
de Magnetização - (Amostra n. III - S2)'), grid
% eof

```

- Função usada no ajuste das curvas

```

%-----
% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA - CEEI
% DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE
% LABORATÓRIO DE MÁQUINAS ELEÉTRICAS
%
% Curvas de Magnetização B-H (teóricas)
% Aluno: Ericson Norberto A. Santos
%-----
function createFit(H, B)
%CREATEFIT Create plot of data sets and fits
% CREATEFIT(H,B)
% Creates a plot, similar to the plot in the main Curve Fitting Tool,
% using the data that you provide as input. You can
% use this function with the same data you used with CFTOOL
% or with different data. You may want to edit the function to
% customize the code and this help message.
%
% Number of data sets: 1
% Number of fits: 1

% Data from data set "B vs. H":
% X = H:
% Y = B:
% Unweighted

% Auto-generated by MATLAB on 20-May-2013 13:45:13

```

```

% Set up figure to receive data sets and fits
f_ = clf;
figure(f_);
set(f_,'Units','Pixels','Position',[498 179 688 485]);
% Line handles and text for the legend.
legh_ = [];
legt_ = {};
% Limits of the x-axis.
xlim_ = [Inf -Inf];
% Axes for the plot.
ax_ = axes;
set(ax_,'Units','normalized','OuterPosition',[0 0 1 1]);
set(ax_,'Box','on');
axes(ax_);
hold on;

% --- Plot data that was originally in data set "B vs. H"
H = H(:);
B = B(:);
h_ = line(H,B,'Parent',ax_,'Color',[0.333333 0 0.666667],...
    'LineStyle','none','LineWidth',1,...
    'Marker','.', 'MarkerSize',12);
xlim_(1) = min(xlim_(1),min(H));
xlim_(2) = max(xlim_(2),max(H));
legh_(end+1) = h_;
legt_{end+1} = 'B vs. H';

% Nudge axis limits beyond data limits
if all(isfinite(xlim_))
    xlim_ = xlim_ + [-1 1] * 0.01 * diff(xlim_);
    set(ax_,'XLim',xlim_)
else
    set(ax_,'XLim',[-114.52842318097115, 11567.370741278086]);
end

% --- Create fit "fit 1"
ok_ = isfinite(H) & isfinite(B);
if ~all( ok_ )
    warning( 'GenerateMFile:IgnoringNansAndInfs',...
        'Ignoring NaNs and Infs in data.' );
end
st_ = [0.69159907752586558 0.20095617401981869 0.59412260323735111 ];
ft_ = fittype('a*(1-exp(-b*x^c))',...
    'dependent',{'y'},'independent',{'x'},...
    'coefficients',{'a', 'b', 'c'});

% Fit this model using new data
cf_ = fit(H(ok_),B(ok_),ft_,'Startpoint',st_);
% Alternatively uncomment the following lines to use coefficients from the
% original fit. You can use this choice to plot the original fit against new
% data.
% cv_ = { 1.7247568460681475, 0.015446269919511897, 0.49833540776800822};
% cf_ = cfit(ft_,cv_{:});

% Plot this fit
h_ = plot(cf_,'fit',0.95);
set(h_(1),'Color',[1 0 0],...
    'LineStyle','-','LineWidth',2,...
    'Marker','none','MarkerSize',6);
% Turn off legend created by plot method.
legend off;
% Store line handle and fit name for legend.
legh_(end+1) = h_(1);
legt_{end+1} = 'fit 1';

% --- Finished fitting and plotting data. Clean up.
hold off;
% Display legend

```

```

leginfo_ = {'Orientation', 'vertical'};
h_ = legend(ax_, legh_, legt_, leginfo_{:});
set(h_, 'Units', 'normalized');
t_ = get(h_, 'Position');
t_(1:2) = [0.73595, 0.739514];
set(h_, 'Interpreter', 'none', 'Position', t_);
% Remove labels from x- and y-axes.
xlabel(ax_, '');
ylabel(ax_, '');

```

- Programa usado para plotar as curvas de magnetização teóricas (ajustadas)

```

%-----%
% UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
% CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA - CEEI
% DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE
% LABORATÓRIO DE MÁQUINAS ELEÉTRICAS
%
% Curvas de Magnetização B-H (teóricas)
% Aluno: Ericson Norberto A. Santos
%-----%
clc
close all
clear all

% Curva de magnetização teórica - Amostra n. I
x1 = 0:0.01:100;
y1 = [];

[~, n] = size(x1);
for k=1:n
    y1(1, k) = 1.333*(1-exp(-0.02181*k^0.4638));
end

% Curva de magnetização teórica - Amostra n. II
x2 = 0:0.01:100;
y2 = [];

[~, n] = size(x2);
for k=1:n
    y2(1, k) = 1.4*(1-exp(-0.02313*k^0.4535));
end

% Curva de magnetização teórica - Amostra n. III
x3 = 0:0.01:100;
y3 = [];

[~, n] = size(x3);
for k=1:n
    y3(1, k) = 1.725*(1-exp(-0.01545*k^0.4983));
end

% Amostra n. I
figure(1)
plot(x1, y1), xlabel('H x 100 (Aesp/m)'), ylabel('B(H) (Tesla)'), title('Curva de
Magnetização - (Amostra n. I - Ajuste)'), legend('y(x) = 1.333*(1-exp(-
0.02181*x^{0.4638}))'), grid

% Amostra n. II
figure(2)
plot(x2, y2), xlabel('H x 100 (Aesp/m)'), ylabel('B(H) (Tesla)'), title('Curva de
Magnetização - (Amostra n. II - Ajuste)'), legend('y(x) = 1.400*(1-exp(-
0.02313*x^{0.4535}))'), grid

% Amostra n. III
figure(3)

```

```
plot(x3, y3), xlabel('H x 100 (Aesp/m)'), ylabel('B(H) (Tesla)'), title('Curva de  
Magnetização - (Amostra n. III - Ajuste)'), legend('y(x) = 1.725*(1-exp(-  
0.01545*x^{0.4983}))'), grid
```

```
% As tres amostra em grafico único
```

```
figure(4)
```

```
plot(x1, y1, x2, y2, x3, y3), xlabel('H x 100 (Aesp/m)'), ylabel('B(H) (Tesla)'),  
title('Curva de Magnetização - (Amostra n. I - Ajuste)'), legend('Amostra I - y(x)  
= 1.333*(1-exp(-0.02181*x^{0.4638}))', 'Amostra II - y(x) = 1.400*(1-exp(-  
0.02313*x^{0.4535}))', 'Amostra III - y(x) = 1.725*(1-exp(-0.01545*x^{0.4983}))'),  
grid
```