



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

**CÁLCULO DE PERDAS MAGNÉTICAS EM TORRES DE LINHAS AÉREAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
EM CORRENTE ALTERNADA**

Gustavo Frederico Soares de Oliveira

**RIO DE JANEIRO
FEVEREIRO DE 2011**

Gustavo Frederico Soares de Oliveira

**CÁLCULO DE PERDAS MAGNÉTICAS EM TORRES DE LINHAS AÉREAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
EM CORRENTE ALTERNADA**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

**RIO DE JANEIRO
FEVEREIRO DE 2011**

**CÁLCULO DE PERDAS MAGNÉTICAS EM TORRES DE LINHAS AÉREAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
EM CORRENTE ALTERNADA**

Gustavo Frederico Soares de Oliveira

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.
(Orientador)

Eng. Luis Adriano de Melo Cabral Domingues, M.Sc.
(Co-orientador)

Eng. João Clavio Salari Filho, D.Sc.

Prof. Rubens de Andrade Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO
FEVEREIRO DE 2011

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela minha existência, por todas as bênçãos e graças que Ele me proporciona e, principalmente, pelos momentos de reflexão e incentivo, que foram de grande valia nesta trajetória, muitas vezes “sozinho”.

Em especial, agradeço aos meus pais, Nadir Soares de Oliveira e Adelino Toledo de Oliveira, os quais foram os grandes idealizadores desta minha conquista.

Agradeço às minhas irmãs, Flávia e Julliany, pelas conversas, pelo auxílio na tomada de decisões, pelo apoio e incentivo.

Agradeço a minha namorada, Joyce, pelo carinho e por poder compreender meus momentos de renúncia ao seu lado em prol desta jornada. Mais do que isto, agradeço-a pela grande bênção que me proporcionou, minha filha Lavigneia, a qual tenho a certeza de estar sendo cuidada com muito amor e dedicação em minha ausência.

Agradeço a todos os professores que participaram da minha formação profissional, ao professor Antonio Carlos Siqueira de Lima, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que se colocou a minha disposição para me orientar neste projeto, ao professor Rubens de Andrade Junior, por ser receptivo ao convite de participação da banca para avaliação deste trabalho.

Agradeço a todos os companheiros do Departamento de Linhas e Estações da Eletrobrás Cepel. Em especial aos meus supervisores, Luis Adriano Cabral e Carlos Ruy, pelo apoio e por depositarem em mim a confiança de poder dirigir este projeto de tamanha importância.

Em especial, também agradeço ao João Clávio Salari e ao Márcio Antonio Sens pelo aprendizado e o apoio e pelos longos períodos de conversa, que muito contribuíram para a realização deste projeto.

Agradeço aos professores do Instituto de Física da UFRJ, em especial a professora Wania Wolff, com a qual passei por um longo aprendizado ao longo da graduação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

CÁLCULO DE PERDAS MAGNÉTICAS EM TORRES DE LINHAS AÉREAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
EM CORRENTE ALTERNADA

Gustavo Frederico Soares de Oliveira

FEVEREIRO/2011

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Curso: Engenharia Elétrica

As perdas magnéticas nas estruturas metálicas das linhas de transmissão não são, normalmente, calculadas ou medidas. Todavia, podem ser, eventualmente, bastante importantes e, até, para algumas condições desfavoráveis, ser da ordem de grandeza das perdas nos condutores de fase. Outro aspecto importante é a falta de padronização que caracteriza os parâmetros eletromagnéticos das estruturas metálicas que compõem as torres de transmissão. Neste contexto, este trabalho contempla um estudo experimental e teórico, que visa estimar a ordem de grandeza das perdas magnéticas em duas estruturas típicas de torres de transmissão de energia elétrica, e verificar a importância destas perdas no cenário de perdas de potência de um sistema de transmissão.

Palavras chave: perdas magnéticas, campo magnético, indução magnética, cantoneira, torres de transmissão.

Índice

CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1. Motivação	2
1.2. Proposta	3
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Estrutura do Trabalho	4
CAPÍTULO 2	6
Introdução aos Materiais Magnéticos.....	6
2.1. Dipolo Magnético	6
2.2. Um modelo das propriedades magnéticas dos materiais: Magnetização	8
2.3. Classificação dos materiais magnéticos	11
2.3.1. Materiais diamagnéticos	11
2.3.2. Materiais paramagnéticos	11
2.3.3. Materiais ferromagnéticos	12
2.4. Curva de Magnetização e Histerese Magnética.....	14
CAPÍTULO 3	17
Perdas Magnéticas em Chapas Ferromagnéticas.....	17
3.1. Modelagem matemática.....	17
3.2. Metodologia experimental de separação das perdas.....	20
3.2.1. Bancada Experimental	20
3.2.2. Determinação das perdas magnéticas	22
3.2.3. Metodologia para a separação das perdas no material	23
CAPÍTULO 4	25
Ensaio para o Levantamento dos Parâmetros de Perdas Magnéticas em Cantoneiras.....	25
4.1. Características dos espécimes sob ensaio	25
4.2. Modelagem matemática.....	26
4.3. Metodologia experimental de separação das perdas nas amostras	27
4.3.1. Bancada Experimental	27
4.3.2. Aquisição dos dados experimentais.....	29
4.3.3. Procedimentos para a separação das perdas magnéticas	32
4.4. Resultados experimentais	32
4.4.1. Cantoneira 01	33
4.4.2. Cantoneira 02.....	34
4.4.3. Cantoneira 05.....	35
4.4.4. Cantoneira 06.....	36
4.4.5. Parâmetros característicos de perdas magnéticas nas amostras.....	37
4.5. Análise dos resultados	38
CAPÍTULO 5	40
Ensaio para o Levantamento da Curva B_m-H_m	40
5.1. Levantamento da curva B_m-H_m	40
5.1.1. Fundamentos teóricos	40
5.1.2. Bancada experimental.....	44
5.1.2. Resultados experimentais	45
5.1.3. Análise dos resultados	46

CAPÍTULO 6	51
Metodologia para o Cálculo de Perdas Magnéticas em Cantoneiras sob Regimes de Indução Não Uniformes e Ensaio de Verificação.....	51
6.1. Metodologia de cálculo	51
6.2. Ensaio de verificação	54
6.2.1. Configurações “cantoneira solitária” e “janela”	55
6.2.2. Resultados experimentais e comparação com a metodologia proposta.....	63
6.2.2.1. Ensaio 01	65
6.2.2.2. Ensaio 02	67
6.2.2.3. Ensaio 03	69
6.2.2.4. Ensaio 04	71
6.2.2.5. Ensaio 05	72
6.2.2.6. Ensaio 06	74
6.2.2.7. Ensaio 07	76
6.2.3. Análise dos resultados	78
CAPÍTULO 7	81
Cálculo de Perdas Magnéticas em Torres de Transmissão de Energia Elétrica.....	81
7.1. Aspectos básicos.....	82
7.2. Simulação computacional.....	85
7.2.1. Modelagem das torres.....	85
7.2.2. Cálculo tridimensional do campo magnético nos perfis de aço estrutural	87
7.3. Cálculo das perdas magnéticas nas estruturas	88
7.4. Apresentação dos resultados.....	89
7.4.1. Torre autoportante	90
7.4.1.1. Nível 0	90
7.4.1.2. Nível 1	91
7.4.1.3. Nível 2	92
7.4.1.4. Comparação entre os níveis de discretização	93
7.4.2. Torre estaiada	96
7.4.2.1. Nível 0	96
7.4.2.2. Nível 1	97
7.4.2.3. Nível 2	98
7.4.2.4. Comparação entre os níveis de discretização	99
7.4.3. Comparação dos resultados entre as estruturas	101
7.5. Análise dos resultados apresentados.....	103
CAPÍTULO 8	109
Considerações Finais	109
CAPÍTULO 9	110
Referências Bibliográficas.....	110

CAPÍTULO 1

Introdução

No Brasil, as torres de transmissão de energia, que compõem parte do sistema elétrico de transmissão, são constituídas quase exclusivamente de materiais metálicos – cantoneiras de aço galvanizado, cabos estruturais e estais. A interação destes materiais com o campo magnético gerado pelas correntes que circulam nos cabos condutores da linha de transmissão forma, nos mesmos, circuitos magnéticos, suscetíveis à ocorrência de perdas por histerese, e circuitos elétricos, suscetíveis à ocorrência de perdas ôhmicas pela circulação de correntes de Foucault.

Um dos aspectos mais relevantes para a análise quantitativa das perdas nas estruturas metálicas das linhas de transmissão é a caracterização dos parâmetros dos perfis metálicos usados nessas estruturas. Normalmente, o material das estruturas é caracterizado, nas informações dos fabricantes, apenas com uma designação de norma. Devido às características físico-químicas do aço, os seus parâmetros são fortemente afetados pela sua composição e forma de fabrico, incluindo os processos térmicos e de laminagem. Dentro de uma mesma designação comercial simplificada, é normal uma dispersão importante nos parâmetros, especificamente quanto a parâmetros eletromagnéticos, que, nos aços usados nas estruturas de linhas de transmissão, são tratados usualmente como secundários e não são objetos de cuidados específicos dos fabricantes e, na maioria dos casos, não são sequer controlados ou medidos.

A parcela tipicamente mais importante da potência dissipada nas estruturas metálicas, por efeito do campo magnético, é associada às correntes de Foucault. Dentro dos condicionamentos pertinentes ao caso em análise, os parâmetros físicos mais importantes dos materiais utilizados nas estruturas (no que respeita as perdas por corrente de Foucault) são:

- a. Condutividade elétrica do material;
- b. Relação, não linear, entre os campos **H** e **B**.

Para as perdas por histerese propriamente dita, é também, relevante a caracterização das perdas por histerese do material, basicamente para o campo **H** alternado de frequência industrial, quanto a:

- c. Perdas por histerese, por unidade de volume ou de comprimento, para a variação alternada do campo eletromagnético, em função da amplitude de **B** ou de **H**.

Os parâmetros mencionados em **a**, **b** e **c** dependem significativamente de características específicas do material, não sendo definidos razoavelmente pela designação comercial indicada pelo fabricante.

Além dos parâmetros do material usado, o cálculo das perdas originadas nas estruturas pelo campo eletromagnético, exige o conhecimento de:

- i. Espessura dos perfis metálicos utilizados;
- ii. Dimensões dos diferentes elementos que compõem a estrutura metálica das torres e a geometria das mesmas;
- iii. Corrente circulante nos cabos de fase e cabos para-raios;
- iv. Disposição dos cabos de fase e dos cabos para-raios.

1.1. Motivação

A regra vigente para as empresas transmissoras de energia elétrica implica numa preocupação exclusiva com a disponibilidade das instalações, não remunerando itens relacionados com a eficiência e redução de perdas, tais como, perdas Joule nos condutores e cabos para-raios, perdas Corona, perdas nas cadeias de isoladores, perdas nas estruturas de aço das torres, etc. Desta forma o tradicional controle de itens de projeto, manutenção e operação de linhas visando o controle das perdas deixou de ser feito por não haver o necessário estímulo econômico à sua execução.

Como o custo das perdas no sistema de transmissão recai sobre os consumidores, é importante que o Ministério de Minas e Energia (MME) atue como elemento de controle desse processo, sugerindo ações de redução das perdas evitáveis e eventualmente propondo incentivos e remuneração adicional para as empresas implantarem procedimentos para a redução das perdas.

A proposta de modelos eficientes para se estimar as perdas que compõem o sistema elétrico de transmissão é de grande importância para que ações práticas, de prevenção e de correção sejam tomadas, a fim de minimizar o efeito desse fenômeno.

1.2. Proposta

No panorama atual sobre o estudo de perdas no sistema de transmissão, merece destaque o estudo das perdas nas estruturas de aço que compõem as torres de transmissão de energia. Esse destaque está ligado à carência de um modelo que apresente parâmetros eletromagnéticos mais precisos, que caracterizem os perfis de aço estrutural sob o ponto de vista eletromagnético.

De acordo com o estudo teórico levantado em [1], há a hipótese das perdas em estruturas de aço das torres de transmissão ser uma parcela apreciável dentro do cenário de perdas no sistema de transmissão. No entanto, por se tratar de um estudo teórico, onde se considera hipóteses, não há como comprovar a veracidade da ordem de grandeza dos resultados obtidos naquele estudo.

Neste âmbito, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobrás Cepel), em Convênio com o MME, realizou um levantamento, através de ensaios, de características elétricas e magnéticas de um conjunto de onze cantoneiras de aço galvanizado destinadas às estruturas metálicas das torres de linhas de transmissão de energia elétrica.

Dentre os ensaios realizados, foram definidos parâmetros que permitiram a modelagem de perdas magnéticas nas amostras quando submetidas à ação de campo magnético uniforme e cuja distribuição espacial é orientada na mesma direção do perfil mais extenso do material.

Dentro de hipóteses plausíveis e inerentes ao fenômeno de perdas magnéticas em cantoneiras, este trabalho tem como enfoque as seguintes propostas:

- i. Desenvolver um método matemático que seja capaz de estimar as perdas magnéticas em cantoneiras sob a ação de campos magnéticos não uniformes e de qualquer orientação espacial sobre a amostra;
- ii. Validar, através de ensaios experimentais, o modelo desenvolvido.

É importante enfatizar que o principal objetivo de uma modelagem é atingir uma representação precisa do fenômeno sob estudo; porém, a sua generalização deve ser feita de

forma minuciosa, principalmente neste caso, em que o modelo envolve parâmetros intrínsecos a cada amostra.

1.3. Objetivos

Dando sequência, este trabalho tem como objetivo a aplicação do método desenvolvido para estimar as perdas nas estruturas de aço estrutural que compõem as torres de transmissão de energia.

A aplicação do método se dará em dois tipos de torres: autoportante e estaiada. A modelagem estrutural da torre autoportante terá como referência o dimensionamento real das torres que compõem o sistema de transmissão de 525 kV que liga a usina de Itaipu a SE de Foz do Iguaçu. A torre estaiada é um caso estilizado, tendo como exemplo para a aplicação do modelo proposto.

Após a aplicação do modelo, será feita uma análise comparativa entre os casos e, para cada caso, uma comparação com as perdas Joule e Corona nos condutores. Esta comparação, sob algumas condições, de operação da linha e de ambiente, permitirá verificar a contribuição que o tipo da perda em estudo tem dentro do cenário das perdas de um sistema de transmissão.

Cabe ressaltar que o objetivo deste trabalho não é tirar conclusões quantitativas genéricas sobre os valores obtidos nos casos em estudo. Contudo, a ordem de grandeza dos resultados será um diagnóstico que informará se realmente as perdas magnéticas nas estruturas de torres de transmissão são importantes para que medidas de controle ou otimização de projeto possam ser tomadas. Obviamente, dentro de uma relação custo benefício favorável.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em 3 blocos: teórico, experimental e aplicação.

O bloco teórico é composto pelos capítulos 2 e 3. No capítulo 2 é feito um estudo visando chegar às propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos. No capítulo 3 é apresentada uma metodologia de estudo, que vem sendo empregada atualmente, sobre perdas magnéticas em chapas de materiais ferromagnéticos.

O bloco experimental é constituído por 3 capítulos: 4, 5 e 6. No capítulo 4 é apresentada uma metodologia experimental utilizada para determinar as perdas magnéticas

em um conjunto de cantoneiras que compõem as estruturas de uma torre de transmissão de energia. Através dos resultados é feito um ajuste, baseado em um modelo de perdas magnéticas, com o objetivo de poder descrever o fenômeno quantitativamente.

No capítulo 5 é apresentado o ensaio para determinar a curva de histerese do material que constitui o conjunto de cantoneiras.

No capítulo 6 é proposto um método para o cálculo de perdas magnéticas com o objetivo de determiná-las quando amostras de materiais ferromagnéticos são submetidas a campos magnéticos com qualquer orientação espacial. Para certificar-se do método, são realizados ensaios onde cantoneiras são dispostas em campo magnético rotacional.

O bloco aplicação, composto pelo capítulo 7, é onde se dá aplicação do método proposto. Neste caso, o método é utilizado para estimar as perdas magnéticas em dois tipos de estrutura de torres de transmissão, autoportante e estaiada.

CAPÍTULO 2

Introdução aos Materiais Magnéticos

Neste capítulo vai-se fazer uma breve introdução aos fenômenos do magnetismo, ao porquê do comportamento dos diversos materiais em face dos campos magnéticos, e dos tipos de materiais magnéticos existentes.

2.1. Dipolo Magnético

Basicamente, um *dipolo magnético* pode ser visto como um pequeno circuito ou espira (“loop”), de raio a e área S , no qual circula uma corrente elétrica I , tal como se pode ver na figura 2.1. Esta corrente elétrica cria um campo magnético em cada ponto do espaço. Se o ponto, $P(r, \theta, \phi)$, estiver suficientemente afastado da espira, tal que $r \gg a$, o vetor indução magnética \mathbf{B} em P é dado por [2]

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I a^2}{4r^3} (2\cos\theta \mathbf{a}_r + \sin\theta \mathbf{a}_\theta) \quad [T] \quad (2.1)$$

sendo μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, em H/m , I é a corrente no circuito em A, r é o raio do circuito, em m, r é a distância entre o circuito e o ponto P , em m, θ é o ângulo entre o eixo cartesiano z e o eixo esférico r e \mathbf{a}_r e \mathbf{a}_θ são os vetores unitários nas direções r e θ , respectivamente.

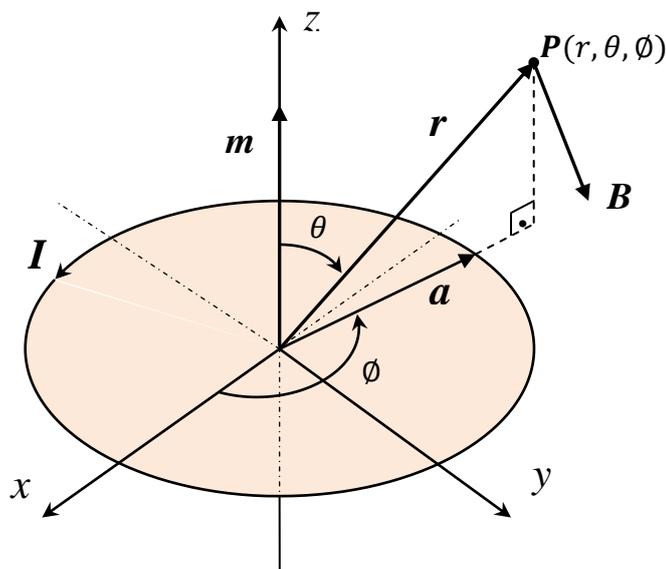


Figura 2.1 – Dipolo Magnético: Campo Magnético B em um ponto muito distante do dipolo magnético.

Define-se agora o produto da corrente que circula na espira pelo vetor área da espira como o momento de dipolo magnético, \mathbf{m} , com unidade $A \cdot m^2$. Assim,

$$\mathbf{m} = I\mathbf{S} \quad [A \cdot m^2] \quad (2.2)$$

$$\mathbf{S} = S\mathbf{a}_n \quad [m^2] \quad (2.3)$$

$$S = \pi a^2 \quad [m^2] \quad (2.4)$$

$$\mathbf{S} = \pi a^2 \mathbf{a}_n \quad [m^2] \quad (2.5)$$

$$\mathbf{m} = I\pi a^2 \mathbf{a}_n \quad [A \cdot m^2] \quad (2.6)$$

sendo \mathbf{a}_n o vetor unitário normal à superfície da espira. No caso em análise, o vetor normal à superfície da espira pode ser dado pelo vetor unitário normal ao plano formado pelos eixos cartesianos x e y , ou seja, por \mathbf{a}_z . Em particular teremos a seguinte expressão para o momento de dipolo magnético:

$$\mathbf{m} = I\pi a^2 \mathbf{a}_n \quad [A \cdot m^2] \quad (2.7)$$

Com esta condição, a equação (2.1) pode ser escrita em termos do momento de dipolo magnético como

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} (2\cos\theta \mathbf{a}_r + \sin\theta \mathbf{a}_\theta) \quad [T] \quad (2.8)$$

O potencial magnético, \mathbf{A} , em Wb/m , no ponto P , criado pelo mesmo dipolo magnético e em termos de seu momento, será

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0 \mathbf{m} \times \mathbf{a}_r}{4\pi r^2} \quad [Wb/m] \quad (2.9)$$

Esses resultados serão importantes para se obter um modelo simples de um átomo e fazer alguma apreciação da diferença de comportamento dos diversos tipos de materiais na presença de campos magnéticos.

2.2. Um modelo das propriedades magnéticas dos materiais: Magnetização

Embora resultados quantitativos precisos somente possam ser obtidos pelo uso da teoria quântica, o modelo atômico simples que considera que há um núcleo central positivo envolvido por elétrons em várias órbitas circulares fornece resultados quantitativos razoáveis e provê uma teoria qualitativa satisfatória.

Basicamente os elétrons apresentam dois tipos de movimentos, são eles:

- i. movimento de translação, denominado movimento orbital, em torno do núcleo do átomo;
- ii. movimento de rotação em torno de seu próprio eixo, *spin do elétron*.

Esses dois movimentos eletrônicos geram campos magnéticos que são similares ao campo magnético produzido por uma pequena espira de corrente, ou seja, por um dipolo magnético. A cada átomo é atribuído três componentes de momento magnético, sendo dois associados ao movimento dos elétrons e o outro ao *spin nuclear*. Associado ao movimento dos elétrons tem-se o momento orbital e de spin dos elétrons. Assim, cada átomo contém muitas componentes diferentes do momento, e a sua combinação determina as características magnéticas dos materiais e permite sua classificação magnética geral.

A *magnetização* \mathbf{M} (A/m) é definida como o momento de dipolo magnético por unidade de volume. Considerando-se N átomos em um dado volume Δv (m^3) e o k -ésimo átomo com um momento de dipolo resultante \mathbf{m}_k , tem-se a seguinte expressão para a magnetização:

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_{k=1}^N \mathbf{m}_k \quad [A/m] \quad (2.10)$$

Quando um material não está submetido a um campo magnético externo, o somatório dos momentos de dipolo resultantes dos átomos é nulo. Isto ocorre devido à orientação randômica dos momentos magnéticos dos átomos. Entretanto a presença de um campo magnético externo perturba o movimento eletrônico, produzindo uma polarização magnética total ou magnetização do material. Em um meio para o qual \mathbf{M} não é nulo em nenhum ponto é dito magnetizado.

Para um volume diferencial dv' , o momento magnético é $d\mathbf{m} = \mathbf{M}dv'$. Da equação (2.9), o potencial magnético vetorial devido a $d\mathbf{m}$ é:

$$d\mathbf{A} = \frac{\mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{a}_r}{4\pi r^2} dv' \quad [Wb/m] \quad (2.11)$$

$$d\mathbf{A} = \frac{\mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{r}}{4\pi r^3} dv' \quad [Wb/m] \quad (2.12)$$

De acordo com a identidade [2]:

$$\frac{\mathbf{r}}{r^3} = \nabla' \frac{1}{r} \quad (2.13)$$

tem-se,

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \mathbf{M} \times \nabla' \frac{1}{r} dv' \quad [Wb/m] \quad (2.14)$$

Como [2]

$$\mathbf{M} \times \nabla' \frac{1}{r} = \frac{1}{r} \nabla' \times \mathbf{M} - \nabla' \times \frac{\mathbf{M}}{r} \quad (2.15)$$

então,

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{\nabla' \times \mathbf{M}}{r} dv' - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \nabla' \times \frac{\mathbf{M}}{r} dv' \quad [Wb/m] \quad (2.16)$$

Aplicando a identidade vetorial [2]

$$\int_{v'} \nabla' \times \mathbf{F} dv' = - \oint_{S'} \mathbf{F} \times d\mathbf{S} \quad (2.17)$$

à segunda parcela integral de (2.16), tem-se:

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{\nabla' \times \mathbf{M}}{r} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{S'} \frac{\mathbf{M} \times \mathbf{a}_n}{r} dS' \quad [Wb/m] \quad (2.18)$$

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{\mathbf{J}_m}{r} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{S'} \frac{\mathbf{K}_m}{r} dS' \quad [Wb/m] \quad (2.19)$$

onde,

$$\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M} \quad [A/m^2] \quad (2.20)$$

$$\mathbf{K}_m = \mathbf{M} \times \mathbf{a}_n \quad [A/m] \quad (2.21)$$

sendo \mathbf{J}_m a densidade de corrente de magnetização ligada, em um volume, ou a densidade de corrente de magnetização em um volume (em ampères por metro quadrado) e \mathbf{K}_m a densidade de corrente ligada em uma superfície (em ampères por metro). A equação (2.19) mostra que o potencial de um corpo magnético é devido à densidade de corrente em um volume através do corpo e de uma corrente sobre a superfície do corpo.

Em um meio magnetizado, tem-se as seguintes relações:

$$\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{J}_f + \mathbf{J}_m = \mathbf{J} \quad [A/m^2] \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \nabla \times \mathbf{H} + \nabla \times \mathbf{M} \quad [A/m^2] \quad (2.23)$$

ou

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad [T] \quad (2.24)$$

A relação mostrada na equação (2.24) mantém-se para todos os materiais, sejam eles lineares ou não. Para materiais lineares, \mathbf{M} depende linearmente de \mathbf{H} , tal que

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad [A/m] \quad (2.25)$$

onde χ_m é uma grandeza adimensional denominada *suscetibilidade magnética* do meio. Substituindo a equação (2.25) na equação (2.24) vem que

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} \quad [T] \quad (2.26)$$

ou

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} \quad [T] \quad (2.27)$$

onde

$$\mu_r = 1 + \chi_m = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.28)$$

A grandeza $\mu = \mu_0\mu_r$ é denominada *permeabilidade* do material e é medida em H/m. A grandeza adimensional μ_r é a razão entre a permeabilidade de um determinado material e a do espaço livre, sendo chamada de *permeabilidade relativa* do material.

2.3. Classificação dos materiais magnéticos

Em geral, a classificação dos materiais em termos de suas propriedades magnéticas ou de seu comportamento magnético é feita utilizando-se a suscetibilidade magnética ou a permeabilidade magnética.

Em termos genéricos, os materiais podem ser agrupados em três categorias principais: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Um material é dito *diamagnético* se tiver $\mu_r \lesssim 1$, isto é, um χ_m muito pequeno e negativo. É dito *paramagnético* se $\mu_r \gtrsim 1$, isto é, um χ_m muito pequeno e positivo. Se $\mu_r \gg 1$, isto é, um χ_m muito grande e positivo, o material é dito *ferromagnético*.

2.3.1. Materiais diamagnéticos

O diamagnetismo ocorre nos materiais em que os campos magnéticos, devido aos movimentos de translação dos elétrons em torno do núcleo e de rotação dos elétrons em torno de seus próprios eixos, se cancelam mutuamente. Desse modo, o momento magnético permanente, também denominado momento magnético intrínseco, de cada átomo é zero, e os materiais são fracamente afetados por campos magnéticos externos. Ao serem submetidos a um campo magnético externo, os materiais diamagnéticos adquirem uma magnetização oposta ao campo aplicado. Exemplos de materiais diamagnéticos: Bismuto, Mercúrio, Prata e Chumbo.

2.3.2. Materiais paramagnéticos

O paramagnetismo ocorre em materiais para os quais os campos magnéticos produzidos pelos movimentos de translação dos elétrons em torno do núcleo e de rotação dos elétrons em torno de seus próprios eixos não se cancelam completamente. A magnitude do momento magnético induzido por um campo magnético externo é extremamente pequena, assim como nos diamagnéticos, porém a magnetização se dá no mesmo sentido do campo aplicado. Exemplos de materiais paramagnéticos: Alumínio, Tungstênio, Platina e Manganês.

2.3.3. Materiais ferromagnéticos

O ferromagnetismo ocorre em materiais para os quais os átomos têm momento magnético intrínseco relativamente grande, como por exemplo, Cobalto, Níquel, Ferro Doce e Ferro-silício. De forma distinta dos materiais diamagnéticos e dos paramagnéticos, os materiais ferromagnéticos têm as seguintes propriedades:

- i. São capazes de serem magnetizados fortemente por um campo magnético;
- ii. Retêm um grau considerável de magnetização quando retirados do campo magnético;
- iii. Perdem suas propriedades magnéticas e tornam-se materiais paramagnéticos lineares quando submetidos a temperaturas acima de uma determinada temperatura conhecida como *temperatura Curie*.
- iv. São não lineares, isto é, a relação constitutiva $\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H}$ não se verifica para materiais ferromagnéticos porque μ_r depende de \mathbf{B} e não pode ser representado por um único valor.

O processo de magnetização que ocorre nos materiais ferromagnéticos é explicado pela *teoria dos domínios magnéticos*. Nos materiais ferromagnéticos, de forma diferente dos diamagnéticos e dos paramagnéticos, os *spins* dos elétrons individuais, ao invés de terem orientação aleatória, estão orientados conjuntamente em domínios; isto significa que um determinado número de *spins* num pequeno domínio de material estão alinhados na mesma direção, na ausência de campos externos, e são mantidos assim por forças de ligações atômicas. A este pequeno volume chama-se **domínio magnético**.

Um domínio magnético tem dimensões da ordem de 0,001 a 1 mm de largura e ocupam um volume que pode variar de 10^{-9} a 1 mm^3 . Por isso, a sua existência pode ser medida e até fotografada, tal como se pode ver na figura 2.2, onde a cada cor diferente, correspondem domínios com orientações diferentes e cada um deles com um forte campo magnético resultante.

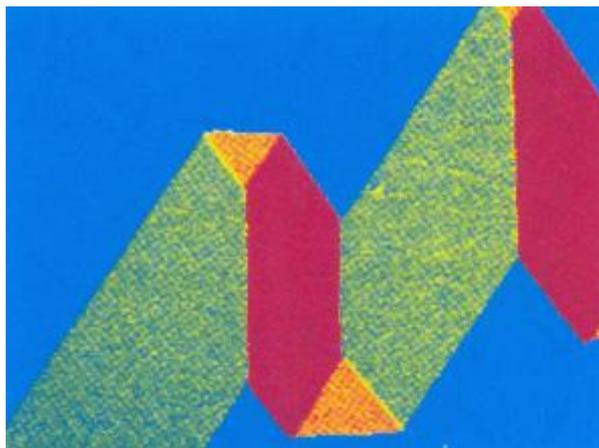


Figura 2.2 – Microfotografia de domínios magnéticos numa amostra de Ferro com 3% de Silício [3].

Os domínios individuais podem ser alinhados em qualquer direção do espaço. A região de transição entre os domínios é designada por **parede do domínio**. Quando um campo magnético externo \mathbf{B}_e é aplicado, os domínios magnéticos tendem a orientar-se de acordo com esse campo. Os domínios que estão desalinhados tendem a girar para a direção do campo magnético externo e os que estão alinhados com o campo permanecem alinhados, mas as paredes dos domínios movem-se, fazendo com que estes domínios cresçam à custa da diminuição dos domínios não alinhados. À medida que o campo externo aumenta, a maioria dos domínios fica alinhada na direção do campo magnético.

A figura 2.3 mostra, esquematicamente, a estrutura dos domínios dos materiais ferromagnéticos durante a magnetização.

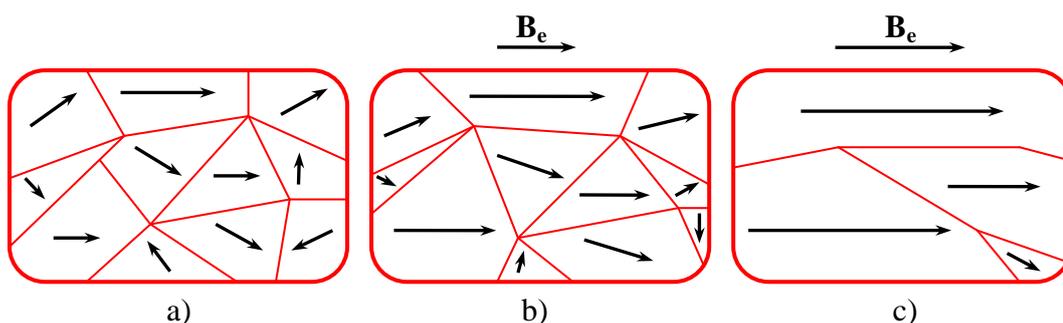


Figura 2.3 – Modelo de domínios para a magnetização em materiais ferromagnéticos: a) domínios não orientados; b) os domínios tendem a se alinhar com o campo externo e os domínios mais alinhados crescem à custa dos menos alinhados; c) os domínios alinhados ocupam todo (ou quase todo) o volume.

O processo de magnetização pode ser mais bem explicado utilizando a chamada **curva de magnetização**.

2.4. Curva de Magnetização e Histerese Magnética

Embora a relação entre \mathbf{B} , \mathbf{H} e \mathbf{M} , como mostrada na equação (2.24), seja válida para todos os materiais, inclusive os ferromagnéticos, a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} depende da magnetização prévia do material ferromagnético, isto é, sua “história magnética”. Como foi visto nas propriedades dos materiais ferromagnéticos, a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} não é linear. A representação dessa relação, para cada material ferromagnético, é feita através de curvas, obtidas experimentalmente, denominadas *curvas de magnetização* ou *curvas B-H*. A figura 2.4 mostra uma curva típica de magnetização.

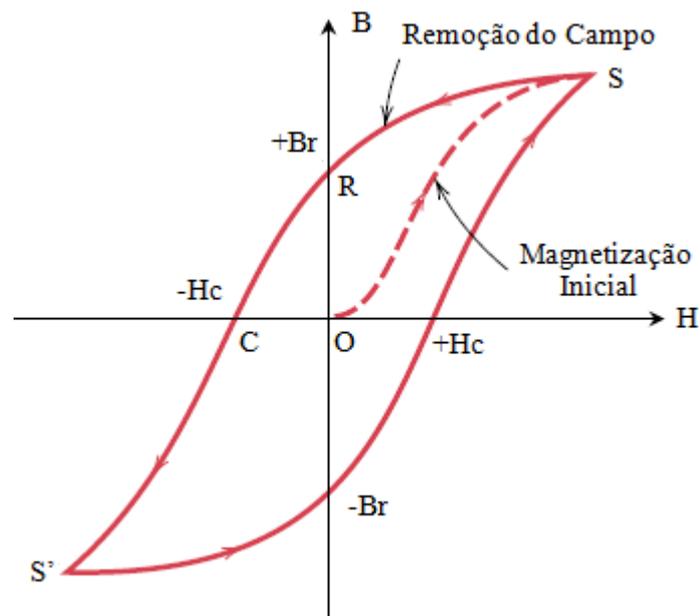


Figura 2.4 – Curva de magnetização (B-H) típica.

Analisando a curva $B-H$ mostrada na figura 2.2, verifica-se que a indução magnética em um material ferromagnético não varia linearmente com o aumento da intensidade de um campo magnético externo ao qual o material é submetido.

Assumindo que o material ferromagnético está inicialmente desmagnetizado, à medida que H aumenta de O até a máxima intensidade de campo aplicada $H_{\text{máx}}$, a curva OS vai sendo gerada. Essa curva é referida como a *curva virgem* ou *curva inicial de magnetização*. Após alcançar a saturação em S , se H diminuir, B não segue a curva inicial, mas se atrasa em relação a H . Esse fenômeno é denominado *histerese*.

Se H for reduzido a zero, B não é reduzido a zero, mas a B_r , que é referido como a *densidade de fluxo remanente*. O valor de B_r depende de $H_{máx}$, a intensidade de campo máxima aplicada. Se H cresce negativamente, B torna-se zero quando H torna-se H_c , que é conhecida como *intensidade de campo coercitiva*. O valor de H_c depende de $H_{máx}$. Materiais para os quais H_c é pequeno são ditos magneticamente macios, para os quais H_c é grande são ditos magneticamente duros.

Um aumento adicional de H na direção negativa até alcançar S' e a reversão até alcançar S resulta em uma curva fechada denominada *laço de histerese*.

A figura 2.5 mostra os laços típicos de histerese para materiais magneticamente moles e magneticamente duros.

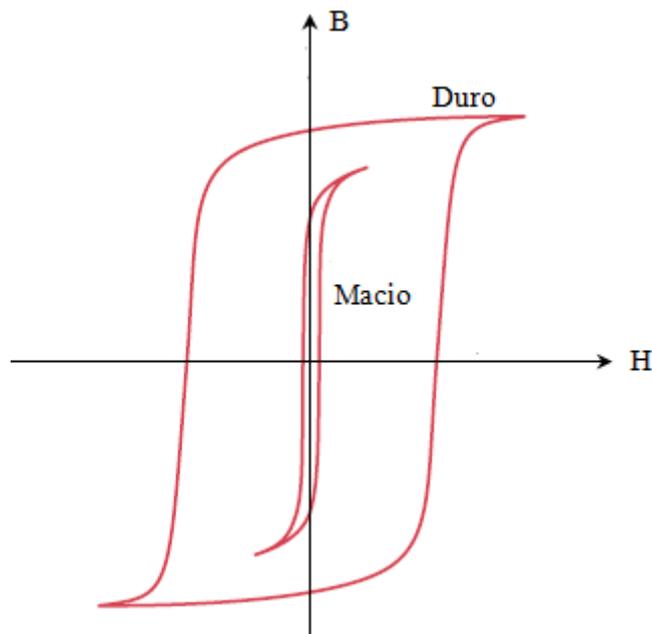


Figura 2.5 – Laços típicos de histerese para materiais ferromagnéticos magneticamente macios e magneticamente duros.

A figura 2.6 mostra uma curva inicial de magnetização e a correspondente evolução dos domínios magnéticos de um material ferromagnético.

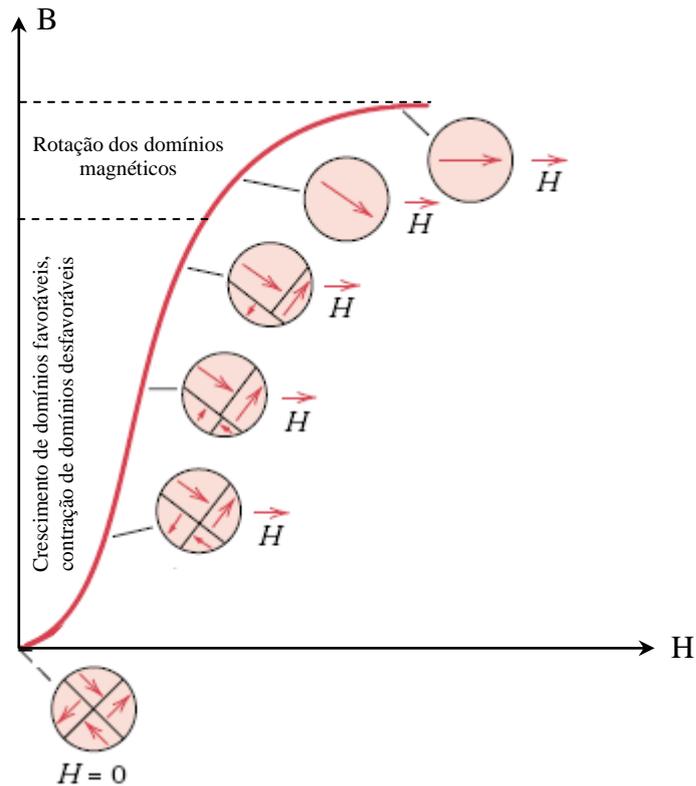


Figura 2.6 – Curva inicial de magnetização e a evolução dos domínios magnéticos até o ponto de saturação.

Sob o ponto de vista do comportamento dos domínios magnéticos, a curva inicial de magnetização pode ser dividida em dois trechos:

1. Crescimento dos domínios magnéticos favoráveis à orientação do campo magnético externo aplicado;
2. Rotação dos domínios magnéticos em direção e sentido ao campo magnético externo aplicado.

Como explicado na seção 2.4 deste capítulo, os domínios magnéticos de um material inicialmente desmagnetizado apresentam uma distribuição espacial aleatória. Ao submetemos o material a um campo magnético, primeiramente haverá o crescimento dos domínios magnéticos favoráveis à orientação do campo aplicado. A partir do término desse crescimento os domínios resultantes tenderão ao movimento de rotação na tentativa de se alinharem com o campo externo. Após todo o processo de rotação, a magnetização do material entra na zona de saturação.

O processo de movimentação e rotação dos domínios magnéticos ocorre durante todo o ciclo de histerese, não sendo uma característica exclusiva da magnetização inicial do material.

CAPÍTULO 3

Perdas Magnéticas em Chapas Ferromagnéticas

A determinação das perdas magnéticas em chapas de matérias ferromagnéticas é um tema de extrema complexidade e que tem despertado bastante interesse da comunidade científica, principalmente por não haver um modelo definitivo para sua previsão.

A metodologia mais utilizada atualmente para estimar e analisar as perdas magnéticas é baseada em um princípio de separação, isto é, considera-se que as perdas totais nas lâminas seja a soma de três parcelas: perdas por histerese W_h , por correntes de Foucault calculadas pelo modelo clássico W_f e por excesso W_e .

Este capítulo é dedicado a uma dissertação expositiva do modelo proposto por [4,5] para o cálculo de perdas magnéticas em chapas ferromagnéticas quando submetidas a um regime de indução senoidal. Será mostrada também uma metodologia experimental, proposta por [6], para determinar as perdas magnéticas.

3.1. Modelagem matemática

De acordo com o estudo realizado por [4,5], as perdas magnéticas em chapas ferromagnéticas podem ser modeladas através da equação 3.1, onde f é a frequência de operação, de período T , com lâminas de espessura d , condutividade elétrica σ , densidade específica m_v , e de seção magnética efetiva S . O parâmetro V_0 equivale a um campo coercitivo em excesso no processo de magnetização do material e G é uma constante que representa o coeficiente de atrito do movimento das paredes do domínio magnético.

$$W(t)_{tot} = W(t)_h + \frac{\sigma d^2}{12f m_v} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt + \frac{\sqrt{\sigma G V_0 S}}{f m_v} \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{1,5} dt \quad [J/Kg] \quad (3.1)$$

A perda por histerese W_h , equação (3.2), corresponde ao valor da área da curva de histerese e dos seus laços menores, se existirem.

$$W_h = \frac{1}{m_v} \int_{B|_0}^{B|_T} H(t) dB(t) \quad [J/Kg] \quad (3.2)$$

No processo de magnetização, o fenômeno de histerese é provocado por dois mecanismos: movimento das paredes e rotação dos domínios. Na região de deslocamento das paredes de domínio, a energia utilizada no processo é dissipada, enquanto na rotação seria conservada. Mas mesmo onde predomina a magnetização por rotação ocorre energia dissipada, pois o ramo descendente não volta sobre o ramo ascendente da curva de histerese. Esta perda pode ser devida a uma parcela de energia dissipada em rotações irreversíveis, e/ou à movimentação de paredes de domínio durante a aniquilação de domínios (ramo ascendente) e/ou durante a nucleação de domínios (ramo descendente) [7].

O emprego e a solução da equação (3.2) não são tão fáceis. Um dos métodos mais utilizados no cálculo deste tipo de perda é a equação empírica (3.3) proposta por Steinmetz em 1982.

$$W_h = K_h(B_m)^\alpha \quad [J/Kg] \quad (3.3)$$

A constante K_h depende do material e do sistema de unidades utilizado, e o expoente α depende apenas do material. B_m é a máxima indução no material, em um ciclo de histerese, quando sujeito ao campo magnético externo.

Trabalhos já publicados constaram que a perda por histerese medida obedece à fórmula de Steinmetz até certos valores de máxima indução B_m [7]. [8,9] propõe separar as perdas por histerese em duas componentes: em “baixas induções” e em “altas induções”.

Quando existem laços menores na curva de histerese, o modelo de Steinmetz não consegue contemplá-los [6]. [10] propõe um modelo, equação (3.4), baseado no de Steinmetz.

$$W_h = K_h(B_m)^\alpha \left[1 + \frac{0,65}{B_m} \sum_{i=1}^n \Delta B_i \right] \quad [J/Kg] \quad (3.4)$$

Este modelo efetua a soma para n reversões de densidade de fluxo ΔB_i . Estas reversões de densidade de fluxo podem existir nos dispositivos eletromagnéticos devido à estrutura magnética e/ou a maneira pela qual são alimentados. As reversões de fluxo podem ser calculadas através do método conhecido como “*Rain Flow*” [11]. Este método é amplamente utilizado na engenharia mecânica para determinar as reversões das tensões mecânicas atuando nas estruturas a fim de avaliar os danos por fadiga. O método permite contar os ciclos menores e determinar suas amplitudes ΔB_i . Suas vantagens são: evitar a decomposição harmônica e ser válido para o caso de ondas de B não periódicas.

O segundo termo aditivo da equação (3.1) representa as perdas por correntes de Foucault W_f , as quais provêm das correntes induzidas na chapa quando submetida a um fluxo

magnético variável. O modelo clássico despreza a real presença dos domínios magnéticos e assume um processo de magnetização perfeitamente homogêneo no material magnético.

O terceiro termo aditivo da equação (3.1) é a “*perda por excesso*”. A sua suposta origem é decorrência do excesso de correntes induzidas, além das calculadas pelo modelo clássico, devido ao fenômeno de deslocamento das paredes dos domínios magnéticos. [4] abordou de uma forma estatística o processo de magnetização dinâmica e as perdas por excesso em laminas de materiais magnéticos submetidos a campos magnéticos senoidais. Ele definiu uma entidade física denominada de “*objeto magnético*” **OM**, pela qual a magnetização se inverte.

A noção dos **OMs** se justifica pelo fato de que o deslocamento de uma parede de um domínio, ou segmento de parede, a qual é a origem da variação da magnetização do material, não pode ser feito de forma isolada. O deslocamento de uma parede pode provocar um deslocamento de outros segmentos de uma mesma parede e de várias. Neste caso, diz-se que os diferentes segmentos de uma mesma parede ou conjunto delas são correlacionados. Supõe-se que inicialmente apenas um **OM** esteja ativo. Quando $dB(t)/dt$ cresce, um campo de excesso $H_e(t)$ é necessário para contrabalançar a frenagem aumentada pelas correntes induzidas em excesso. Uma vez que ele seja suficientemente grande, este campo exerce sobre os outros **OMs** uma pressão para torná-los ativos, os quais irão agir da mesma maneira sobre os outros **OMs** passivos, progressivamente aumentando o número de **OMs** ativos e tornando a magnetização homogênea.

A experiência mostra que a relação entre o número de **OMs** ativos e o campo $H_e(t)$ é linear em numerosos materiais cristalinos, e também no Fe-Si [12]. Esta relação é traduzida pelo parâmetro V_0 , equivalente a um campo coercitivo e caracteriza a oposição dos **OMs** em se ativar. A determinação do parâmetro V_0 necessita do número de **OMs** ativos e do campo $H_e(t)$. G é uma constante que representa o coeficiente de atrito de um **OM**. A determinação destes parâmetros exige alta tecnologia e conhecimento adequado para medi-los [7].

As equações (3.1) e (3.2) mostram que a variação da indução magnética no material ao longo do tempo é o que provoca as perdas, sendo um fato coerente com a natureza do processo de magnetização do material. Tendo em vista a necessidade do controle da indução magnética no material, isto é, não existir distorções, harmônicos, na forma do fluxo, obriga-se que a forma de onda da indução seja senoidal. Isto proporciona uma maneira simples de separar as perdas no material ferromagnético. Nos ensaios de caracterização, esta exigência é atendida pelo modo de se alimentar o dispositivo que aloja as amostras [7].

Para uma forma de onda senoidal, a perda total W_{tot} em uma frequência base f_0 é dada pela equação (3.5) em função da indução máxima B_m . Pode-se escrever a equação (3.5) como a equação (3.6) em função das constantes k_h, α, k_f e k_e . Na caracterização experimental, determinam-se estas quatro constantes. A perda pelo fenômeno de histerese é invariável com a frequência. Entretanto, as constantes das perdas dinâmicas, k_f e k_e , podem ser corrigidas para outra frequência f diferente da frequência base f_0 , conforme a equação (3.7) [5].

$$W_{tot} = K_h B_m^\alpha + \frac{\sigma(\pi d)^2}{6m_v} f_0 B_m^2 + \frac{8,763}{m_v} \sqrt{\sigma G V_0 S} \sqrt{f} B_m^{1,5} \quad [J/Kg] \quad (3.5)$$

$$W_{tot} = K_h B_m^\alpha + k_f B_m^2 + k_e B_m^{1,5} \quad [J/Kg] \quad (3.6)$$

$$k_f|_f = \frac{f}{f_0} k_f|_{f_0} \quad e \quad k_e|_f = \sqrt{\frac{f}{f_0}} k_e|_{f_0} \quad (3.7)$$

3.2. Metodologia experimental de separação das perdas

Nesta seção será mostrada a metodologia experimental de separação das perdas proposta por [6]. Contemplando esta metodologia, serão descritos: uma bancada de ensaio, os processos de determinação das perdas no material ferromagnético e, por fim, o método utilizado para separar as perdas em cada parcela que as compõem – histerética, parasita e por excesso.

3.2.1. Bancada Experimental

Os dispositivos eletromagnéticos utilizados normalmente para a caracterização das perdas magnéticas dos materiais possuem um enrolamento primário responsável pela criação do campo magnético e um enrolamento secundário, responsável pela medida da densidade de fluxo magnético nas amostras que formam o núcleo. O dispositivo utilizado pelas normas é o quadro de Epstein, como mostrado na figura 3.1.



Figura 3.1 – Quadro de Epstein padrão 25 cm Yokogawa, com 700 espiras de enrolamento primário, N_p , e 700 para o secundário, N_s [6].

A dificuldade inerente ao sistema é manter a tensão no secundário do transformador na forma senoidal, pois como o circuito magnético não possui entreferro e o material não é linear, a tensão tende a não ser na forma senoidal. Isto ocorre principalmente nos altos valores de indução e principalmente na região de saturação. A solução empregada foi alimentar o dispositivo eletromagnético através de um inversor monofásico de tensão, como mostrado na figura 3.2, com controle da tensão no capacitor do filtro LC , onde E é a fonte de tensão de corrente contínua, S_i interruptores comandados de potência, D_i diodos de potência *freewheel*, L_0 indutor de filtro, C_0 capacitor de filtro, i_p corrente no primário do quadro de Epstein, e V_{ab} tensão entre os pontos "a" e "b".

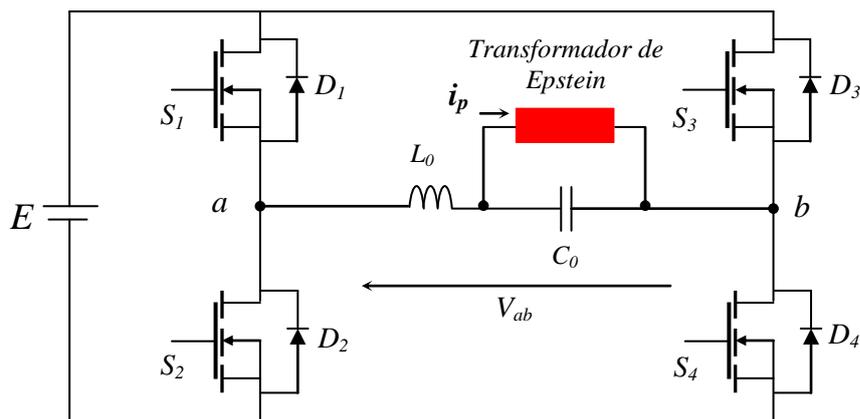


Figura 3.2 – Circuito de potência: inversor, filtro e carga.

Para atingir as metas adequadas à alimentação, isto é, a tensão no enrolamento secundário do Epstein seguir a referência, a evolução da corrente no primário é praticamente livre. O controle aplicado impõe indiretamente a força magnetomotriz para manter a tensão desejada no secundário, ou seja, o fluxo no ferro. O filtro LC fornece apenas a forma de tensão imposta pela referência da forma de onda. Na figura 3.2 está o diagrama funcional do controle implementado [11] para este fim. Acrescenta-se uma malha de controle do nível de tensão contínua na entrada do quadro de Epstein, pois se houver um nível de valor contínuo, este não é transferido ao secundário. O sinal de referência é gerado em um microcomputador utilizando um software.

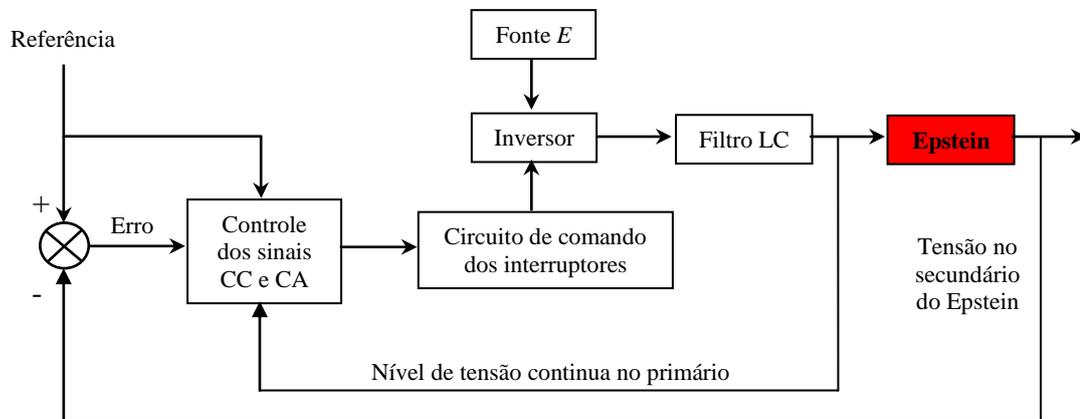


Figura 3.3 – Esquema funcional do sistema em malha fechada.

3.2.2. Determinação das perdas magnéticas

A determinação quantitativa da perda no ferro é realizada através de medidas das grandezas elétricas envolvidas. Mede-se simultaneamente a tensão no secundário e a corrente no primário do transformador de Epstein em dois canais de um osciloscópio digital comunicável através de GPIB. Através de um software determina-se o valor das perdas nas lâminas e demais grandezas. Isto é realizado por cálculo numérico no ambiente do software. A corrente no primário é a imagem do campo H . A integral da tensão no secundário é proporcional à indução B . As grandezas B e H são obtidas por meio de um “Instrumento Virtual” – VI, respectivamente calculadas pelas relações (3.8) e (3.9).

$$B(t) = \frac{1}{N_s S} \int v_s(t) dt \quad [T] \quad (3.8)$$

$$H(t) = \frac{N_p}{l_m} i_p(t) \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (3.9)$$

sendo N_p e N_s o número de espiras do enrolamento primário e secundário, respectivamente, S a seção magnética efetiva, l_m o caminho magnético médio, $v_s(t)$ a tensão nos terminais do enrolamento secundário e $i_p(t)$ a corrente que circula no enrolamento primário.

A integração numérica é realizada pela equação (3.10), onde m é o número de pontos, Δt é o intervalo de tempo entre dois pontos e y_i é o valor pontual integrado do vetor X contendo os pontos medidos em função do tempo.

$$F(t) = \int f(t) dt \rightarrow y_i = \frac{1}{6} \sum_{j=0}^{i=0,1,2,\dots,n-1} (x_{j-1} + 4x_j + x_{j+1}) \Delta t \quad (3.10)$$

Com os valores instantâneos de corrente e tensão no primário do transformador de Epstein em um período da fundamental, calcula-se a potência aparente $S(t)$ fornecida no tempo ao aparelho de Epstein. Subtrai-se da curva da potência aparente a parcela da perda no resistor equivalente à resistência elétrica do primário, restando uma curva de potência aparente magnética $S_{Epstein}(t)$, a qual contém uma parcela de energia magnética armazenada e uma parcela de perda nas amostras. Integrando esta curva, obtém-se o valor médio correspondente à potência ativa dissipada no ferro. Em uma frequência de operação, para cada valor de indução máxima, se realiza este processo até se obter pontos suficientes para formar a curva da perda no ferro.

3.2.3. Metodologia para a separação das perdas no material

Os parâmetros do modelo utilizado da perda por histerese (3.3) de Steinmetz é obtido através da medida da perda no ferro em uma frequência baixa. Isto é feito considerando a hipótese de que nesta condição, de baixa frequência, a perdas histeréticas são aproximadamente as perdas totais, ou seja, $W_{tot}|_{f \ll f_0} \approx W_h$. Esta situação de frequência baixa é chamada de operação quase estática $f \ll f_0$. Mede-se a perda nesta frequência em função da variação da indução máxima para uma forma de onda de indução senoidal, e pela curva de tendência destes pontos medidos, obtêm-se os valores K_h e α .

Para a determinação das constantes K_f e K_e relativas às perdas por correntes de Foucault calculadas classicamente e por excesso, escolhe-se uma frequência de operação base f_0 onde estas perdas têm influências significativas na perda total. Mede-se a perda em função da variação da indução máxima, resultando uma curva da evolução da perda total para esta frequência base e em função da indução máxima. Com os pontos medidos, encontra-se a linha de tendência representada por uma função potencial. A constante K_f da perda por correntes de Foucault é calculada conforme a equação (3.11), através dos parâmetros de σ , m_v e d . Desse modo, a constante da perda excedente K_e é determinada através da equação (3.12).

$$K_f = \frac{\sigma(\pi d)^2}{6m_v} f_0 \quad [J. (Kg. T^2)^{-1}] \quad (3.11)$$

$$K_e = \frac{W_{tot} - (K_h B_m^\alpha + K_f B_m^2)}{B_m^{1,5}} \quad [J. (Kg. T^{1,5})^{-1}] \quad (3.12)$$

CAPÍTULO 4

Ensaio para o Levantamento dos Parâmetros de Perdas Magnéticas em Cantoneiras

A caracterização dos parâmetros de perdas magnéticas em cantoneiras, utilizadas na construção de torres de transmissão, constitui parte do projeto de análise de perdas de potência no sistema de transmissão da rede básica nacional. Esse projeto, firmado em convênio com o Ministério de Minas e Energia, foi realizado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Eletrobrás Cepel.

O ponto de partida deste trabalho foi a utilização dos modelos de perdas magnéticas obtidos para um conjunto de cantoneiras empregadas na construção de torres de transmissão de energia elétrica. Neste contexto, este capítulo tem como principal objetivo mostrar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização de perdas magnéticas nas amostras e fazer uma análise do modelo de separação das perdas adotado.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel, pelo pesquisador Márcio Antônio Sens. Cabe ressaltar que a realização deste trabalho não contemplou a execução de ensaios, mas sim a utilização dos resultados experimentais, os quais foram de suma importância para a realização do mesmo.

4.1. Características dos espécimes sob ensaio

Entende-se por cantoneiras, barras metálicas com seção transversal em forma de ângulo reto, semelhante à letra L, com abas de mesma largura ou não. São produzidas em aço com baixo e médio teor de carbono, de acordo com as normas NBR 6109/83 (qualidade comercial), ASTM A36 e ASTM A572 (qualidade estrutural), com superfície especial para galvanização. As cantoneiras são empregadas principalmente em estruturas metálicas, torres de transmissão de energia elétrica e de telecomunicação, serralheria, esquadrias, máquinas e implementos agrícolas e rodoviários, e na indústria mecânica em geral.

Foi submetido aos ensaios um conjunto de onze cantoneiras de aço galvanizado, inicialmente desmagnetizadas, destinadas às estruturas metálicas de torres de linhas de transmissão de energia elétrica, nas dimensões de 76 x 76 mm por um metro de comprimento.

A figura (4.1) mostra a fotografia de uma cantoneira do tipo L com abas iguais, e a tabela (4.1) apresenta algumas características dimensionais e físicas das amostras ensaiadas.



Figura 4.1 – Fotografia de uma cantoneira do tipo L com abas iguais.

Tabela 4.1 – Características dimensionais e físicas das amostras [13].

Amostra	Comprimento Total	Massa Efetiva		Seção Transversal
		(kg)	(kg/m)	
N	(m)	(kg)	(kg/m)	(mm ²)
1	1,001	7,335	7,328	939,2
2	0,999	7,700	7,708	987,9
3	1,001	7,715	7,707	987,9
4	0,997	7,270	7,292	934,6
5	0,999	7,640	7,648	980,2
6	1,001	7,455	7,448	954,6
7	1,000	8,300	8,300	1064,0
8	1,004	7,675	7,644	979,8
9	0,998	7,440	7,455	955,5
10	1,001	7,485	7,478	958,4
11	1,000	7,495	7,495	960,7

4.2. Modelagem matemática

Como visto no capítulo 3 deste trabalho, a metodologia proposta por [4,5] para estimar e analisar as perdas magnéticas é baseada em um princípio de separação, isto é, considera-se que as perdas totais nas lâminas seja a soma de três parcelas: perdas por histerese W_h , por correntes de Foucault calculadas pelo modelo clássico W_f e por excesso W_e . Atualmente, este é o princípio mais aceito e empregado para a separação das perdas magnéticas. No entanto muito ainda se discute sobre este assunto.

Foi mencionado também que a determinação dos parâmetros da parcela correspondente às perdas por excesso exige alta tecnologia e conhecimento adequado para medí-los.

O modelo proposto para a caracterização das perdas magnéticas nas amostras consistiu em separá-las em duas parcelas, conforme é mostrado pela equação 4.1.

$$P_{tot} = \left[K_h \cdot B_m^\alpha + (K_f' \cdot f) \cdot B_m^\beta \right] \cdot f \quad [W/m] \quad (4.1)$$

A primeira parcela corresponde às perdas histeréticas, determinadas na operação quase estática, de baixa frequência (em torno de 1 Hz). A segunda parcela corresponde ao ajuste feito para representar a diferença entre as perdas totais obtidas e as perdas por histerese.

As constantes K_h e K_f' dependem do material sob análise e do sistema de unidades utilizado (W/kg , W/m^3 , W/m), os expoentes α e β dependem apenas do material. A indução magnética máxima à qual o material é submetido é denotada por B_m e a sua frequência por f .

Na literatura, a unidade de medida mais comumente utilizada para representar a perdas magnéticas em chapas de materiais ferromagnéticos é expressa em J/kg . Desta forma, devemos entender que as perdas magnéticas representam a energia perdida por unidade de massa durante um ciclo de magnetização periódica do material. Como o objetivo deste trabalho é estimar as perdas magnéticas em torres de transmissão, e compará-las, sob determinadas condições, com as perdas de potência por efeito Joule e por corona nos cabos condutores, convencionou-se adotar um modelo que representa as perdas magnéticas expressas em termos de potência e não de energia.

4.3. Metodologia experimental de separação das perdas nas amostras

Este tópico, dividido em 3 partes, apresenta a descrição da bancada experimental utilizada para determinar as perdas magnéticas, a aquisição dos dados experimentais e o métodos adotado para a separação das perdas.

4.3.1. Bancada Experimental

Para submeter as amostras ao campo magnético uniforme e senoidal, foi fixado, sobre uma superfície cilíndrica de Policloreto de Vinilo (PVC), um enrolamento constituído por 700 espiras. Este enrolamento, denominado por enrolamento primário, constitui o enrolamento de excitação. A aquisição do valor da indução magnética, calculada a partir do sinal de tensão induzida na amostra, foi realizada utilizando-se um segundo enrolamento, com 700 espiras, colocado sobre a mesma superfície cilíndrica. Este enrolamento, denominado por enrolamento

secundário, constitui o enrolamento de medição de tensão. Ao conjunto descrito anteriormente convencionou-se denotar por arranjo 1.

Uma montagem mais eficaz para a aquisição da indução magnética nas amostras seria a colocação do enrolamento secundário sobre a superfície do corpo de prova, de forma a eliminar a contribuição do fluxo de dispersão. Desta forma, a solução empregada para compensar o fluxo de dispersão foi disponibilizar de um arranjo experimental, denotado por arranjo 2, idêntico ao arranjo 1. Estes arranjos se distinguiram apenas pelo núcleo do circuito magnético. Enquanto o núcleo do arranjo 1 foi composto por ar e corpo de prova, o núcleo do arranjo 2 foi composto apenas de ar.

Dispostos destes arranjos, as ligações entre os enrolamentos dos mesmos foram feitas de forma a permitir a compensação do fluxo de dispersão. Primeiramente os enrolamentos primários foram ligados em série, constituindo o enrolamento de excitação, permitindo a homogeneidade do campo magnético no interior do cilindro de ambos os arranjos. Em seguida, foi feita uma ligação série subtrativa entre os enrolamentos secundários dos arranjos, constituindo o enrolamento de medição de tensão. Essa ligação permitiu que, na ausência da amostra no arranjo 1, a tensão induzida no enrolamento de medição de tensão fosse nula enquanto o campo magnético era aplicado pelo enrolamento de excitação. Isto garantiu que na presença da amostra, a tensão medida nos terminais do enrolamento de medição de tensão fosse devida ao fluxo magnético apenas na amostra.

A figura 4.2 ilustra a bancada descrita. No detalhe tem-se o arranjo 1, onde as amostras eram colocadas individualmente. Ao lado, o arranjo 2 utilizado para eliminar o fluxo a influência do fluxo de dispersão nas medidas de tensão.

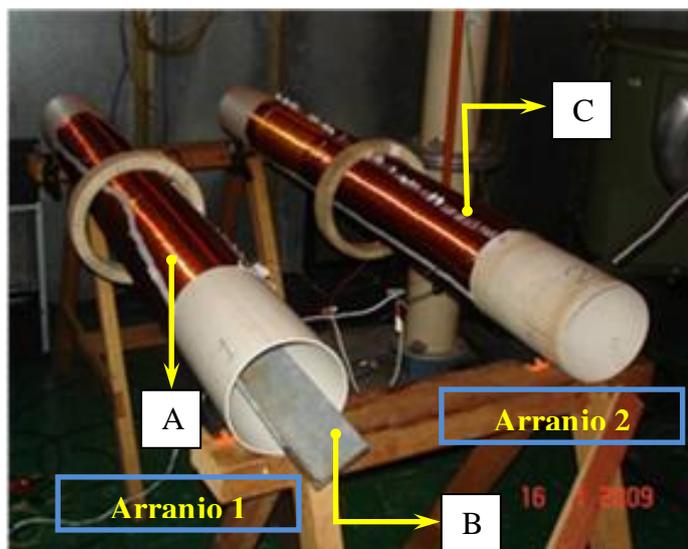


Figura 4.2 – Bancada experimental. Em A – enrolamento primário e enrolamento secundário; B – corpo de prova; C – enrolamento primário e enrolamento secundário.

4.3.2. Aquisição dos dados experimentais

Basicamente, a determinação quantitativa das perdas magnéticas nas amostras foi realizada através da aquisição dos sinais de corrente no enrolamento primário e de tensão no enrolamento secundário. A aquisição dos dados foi feita pelo analisador de potência de alta precisão produzido pela LEM, modelo Norma D6000 [14].

Em cada amostra, as perdas foram obtidas em função da frequência f e da máxima indução magnética, B_m . Como já mencionado neste trabalho, a corrente no primário é a imagem do campo H e a integral da tensão no secundário é proporcional à indução B . Desta maneira, para determinar as perdas em função da máxima indução magnética, foi implementada na interface utilizada pelo analisador a relação mostrada pela equação 4.2,

$$B_m = \frac{V_2}{4,44 N_2 f S} \quad [T] \quad (4.2)$$

sendo V_2 a tensão eficaz nos terminais do enrolamento de medição de tensão, $N_2 = 700$ o número de espiras do mesmo enrolamento, f a frequência de ensaio e S a área da seção transversal da amostra.

A figura 4.3 ilustra o circuito utilizado para as medições. O analisador de potência faz a aquisição temporal e simultânea dos sinais de corrente, I_{exc} , e de tensão, V_2 . A corrente de excitação, responsável pelo campo magnético no núcleo de ambos os arranjos (circuitos magnéticos), é gerada pela fonte Universal HP 3245 [15], produzida *Hewlett-Packard Company*. A bancada dos equipamentos é ilustrada pela figura 4.4.

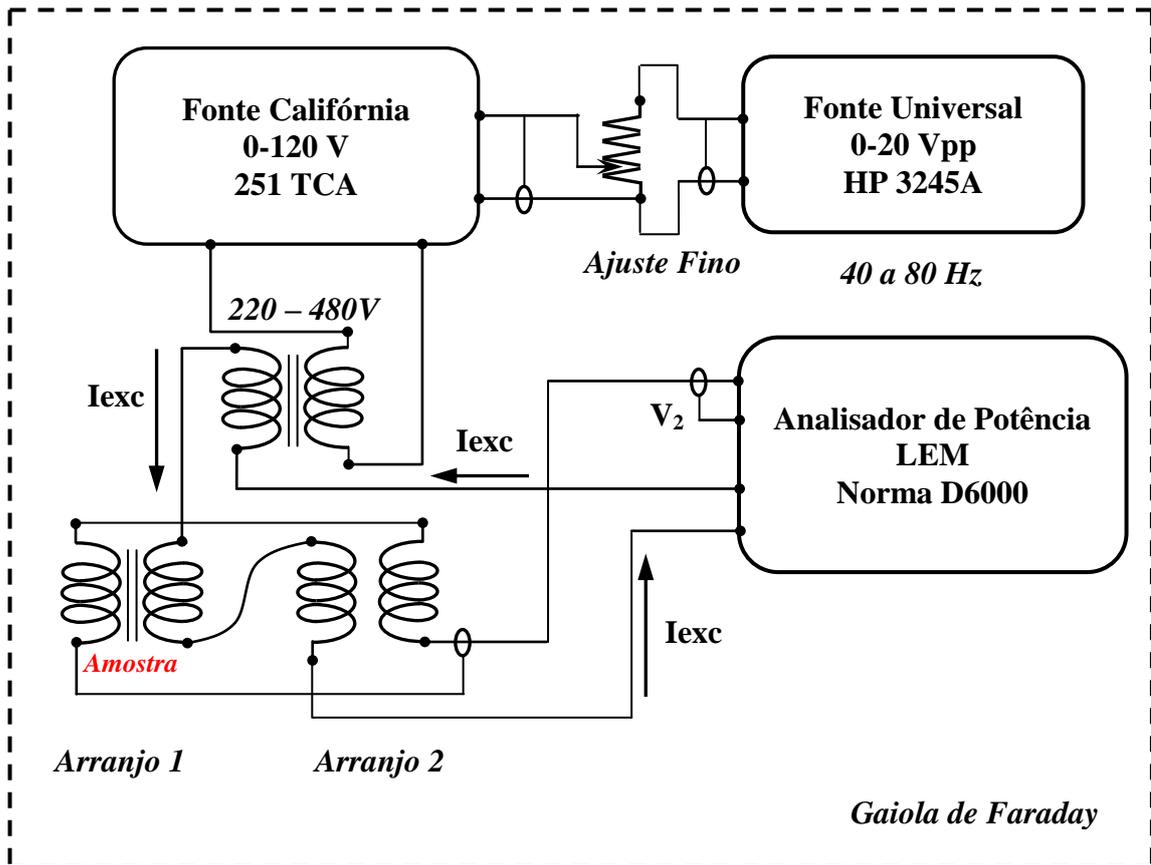


Figura 4.3 – Ilustração do circuito utilizado para determinar as perdas magnéticas nas amostras.

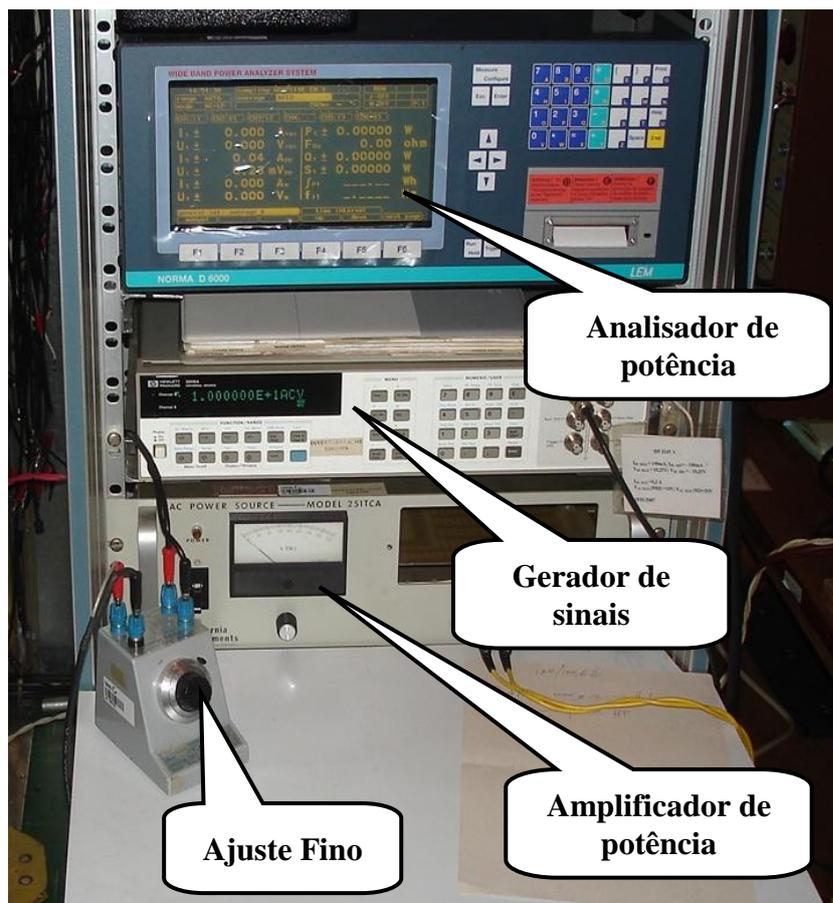


Figura 4.4 – Instrumentação utilizada no ensaio de perdas magnéticas. Analisador de potência; Gerador de sinais: fonte Universal; Amplificador de potência: fonte Califórnia [16]; Ajuste fino: reostato.

Através do sinal de corrente no enrolamento primário e de tensão no enrolamento secundário, o analisador determina a potência e pela relação apresentada pela equação 4.3 determinam-se as perdas magnéticas nas amostras.

$$P_{tot} = P_{analisador} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad [W] \quad (4.3)$$

sendo P_{tot} , as perdas magnéticas nas amostras, $P_{analisador}$ a potência medida pelo analisador e $N_1 = N_2 = 700$, o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.

As perdas específicas totais são obtidas dividindo-se P_{tot} pela massa efetiva da amostra, ou pelo comprimento efetivo da mesma. Com isto se obtém as perdas magnéticas em $[W/kg]$ ou em $[W/m]$, de acordo com a necessidade de aplicação.

4.3.3. Procedimentos para a separação das perdas magnéticas

Os parâmetros K_h e α , referentes à parcela de perdas por histerese, e os parâmetros K_f' e β , da parcela parasítica, foram determinados pelo método das “duas frequências”, cujos procedimentos são descritos na Norma NBR 5161 [17].

A aplicação deste método requer que o ensaio, realizado em cada amostra, seja efetuado para várias frequências que estejam na faixa que vai da metade ao dobro da frequência na qual se quer obter a perda corrigida. Neste caso, os ensaios foram realizados na gama $40 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$. Mantendo o valor da máxima indução magnética no material, traça-se a curva P_{tot}/f em função de f , conforme descreve a equação 4.4.

$$\frac{P_{tot}}{f} = K_h \cdot B_m^\alpha + K_f' \cdot B_m^\beta \cdot f \quad [J/m] \quad (4.4)$$

A partir da curva obtida, como representada pela figura 4.5, extrai-se os valores correspondes às parcelas $K_h B_m^\alpha$ e $K_f' B_m^\beta$, conforme mostrado a seguir:

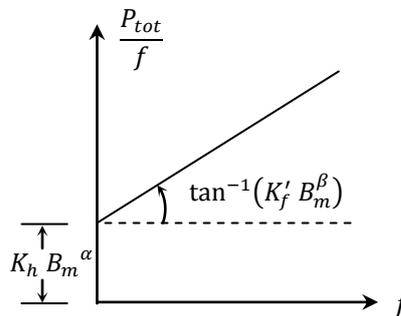


Figura 4.5 – Gráfico de ajuste para a determinação dos parâmetros parasíticos e histeréticos.

4.4. Resultados experimentais

O levantamento das medidas correspondentes às perdas magnéticas nas amostras foi realizado na gama $75 \text{ mT} \leq B_m \leq 300 \text{ mT}$. Primeiramente serão mostrados os resultados experimentais obtidos e de ajuste do modelo para um conjunto de 4 cantoneiras. Os resultados, mostrados por meio de gráficos e de tabelas, correspondem à frequência de ensaio realizado à 60 Hz. As cantoneiras foram identificadas por: cantoneira 01, cantoneira 02, cantoneira 05 e cantoneira 06. Em seguida, serão mostrados os parâmetros obtidos para o conjunto das 11 cantoneiras e, por fim, uma análise dos parâmetros, obtidos com o ajuste do modelo aos dados experimentais.

4.4.1. Cantoneira 01

Tabela 4.2 – Perdas magnéticas da amostra 1 e parâmetros de ajuste relativos ao modelo.

Perdas magnéticas em cantoneiras de aço					
Amostra	Cantoneira 01 - Aço galvanizado para torres			Características Determinadas	
Frequência	60 Hz	Massa Total	7,335 kg	K_h	3,726
Comprimento Total	1,001 m	Massa Efetiva	7,335 kg	K'_f	0,187
Comprimento Efetivo	1,001 m	Bobina	700 espiras	α	1,661
Massa Específica	7802 kg/m ³	Área	939,2 mm ²	β	2,203
Resultados experimentais - Leituras			Calculados		
Indução Magnética (mT)	Ptot (W)	Ptot (W/m)	Ptot (W/kg)	Ptot (W/m)	
75	5,5558	5,5502	0,718	5,262	
100	9,3097	9,3004	1,241	9,094	
125	14,0490	14,0350	1,905	13,96	
150	19,8527	19,8329	2,711	19,87	
175	26,8230	26,7962	3,661	26,82	
200	35,0240	34,9890	4,755	34,84	
225	44,6300	44,5854	5,995	43,93	
250	55,6860	55,6304	7,382	54,09	
275	67,8640	67,7962	8,917	65,34	
300	81,8920	81,8102	10,600	77,69	

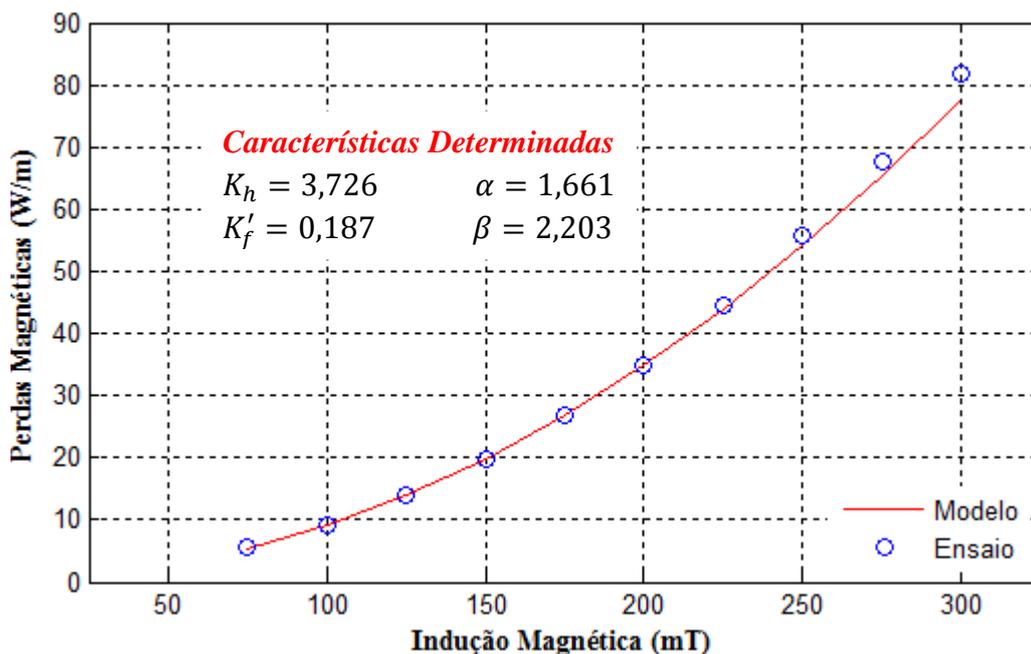


Figura 4.6 – Perdas magnéticas, à 60 Hz, da cantoneira 1 em função da máxima indução magnética; ajuste do modelo aos dados obtidos pelo ensaio.

4.4.2. Cantoneira 02

Tabela 4.3 – Perdas magnéticas da amostra 2 e parâmetros de ajuste relativos ao modelo.

Perdas magnéticas em cantoneiras de aço					
Amostra	Cantoneira 02 - Aço galvanizado para torres			Características Determinadas	
Frequência	60 Hz	Massa Total	7,700 kg	K_h	3,647
Comprimento Total	0,999 m	Massa Efetiva	7,700 kg	K'_f	0,167
Comprimento Efetivo	0,999 m	Bobina	700 espiras	α	1,603
Massa Específica	7802 kg/m ³	Área	987,9 mm ²	β	2,160
Resultados experimentais - Leituras			Calculados		
Indução Magnética (mT)	Ptot (W)	Ptot (W/m)	Ptot (W/kg)	Ptot (W/m)	
75	5,9090	5,9149	0,736	5,673	
100	9,7892	9,7990	1,247	9,612	
125	14,5757	14,5903	1,885	14,53	
150	20,3684	20,3888	2,650	20,43	
175	27,1950	27,2222	3,542	27,30	
200	35,1570	35,1922	4,560	35,15	
225	44,4100	44,4545	5,705	43,97	
250	55,0080	55,0631	6,977	53,78	
275	66,9960	67,0631	8,377	64,57	
300	80,4510	80,5315	9,905	76,34	

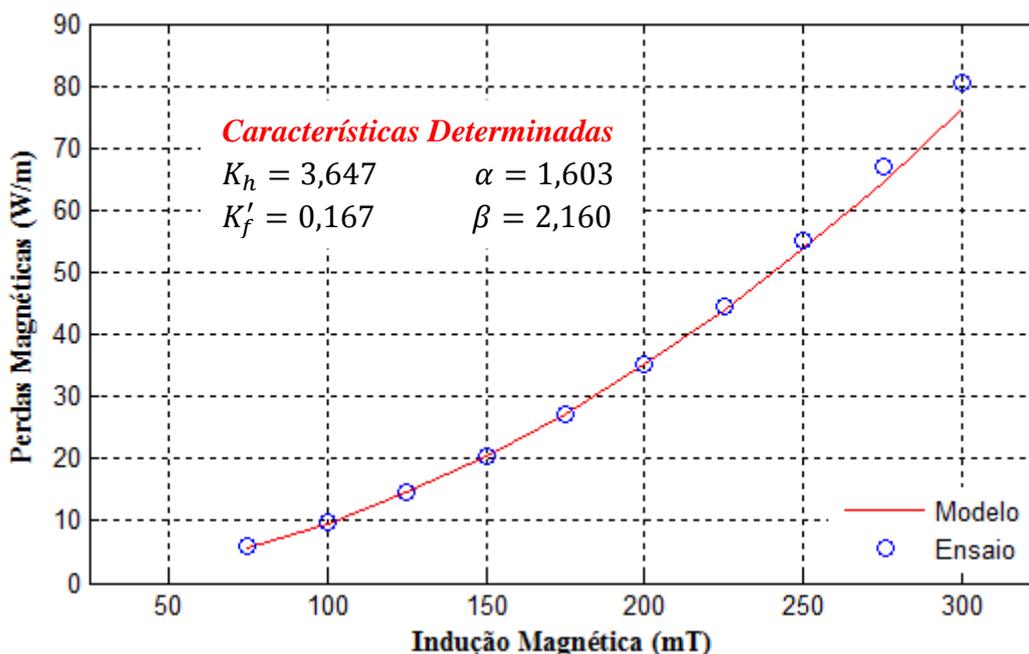


Figura 4.7 – Perdas magnéticas, à 60 Hz, da cantoneira 2 em função da máxima indução magnética; ajuste do modelo aos dados obtidos pelo ensaio.

4.4.3. Cantoneira 05

Tabela 4.4 – Perdas magnéticas da amostra 5 e parâmetros de ajuste relativos ao modelo.

Perdas magnéticas em cantoneiras de aço					
Amostra	Cantoneira 05 - Aço galvanizado para torres			Características Determinadas	
Frequência	60 Hz	Massa Total	7,640 kg	K_h	3,950
Comprimento Total	0,999 m	Massa Efetiva	7,640 kg	K'_f	0,160
Comprimento Efetivo	0,999 m	Bobina	700 espiras	α	1,660
Massa Específica	7802 kg/m ³	Área	980,2 mm ²	β	2,100
Resultados experimentais - Leituras			Calculados		
Indução Magnética (mT)	Ptot (W)	Ptot (W/m)	Ptot (W/kg)	Ptot (W/m)	
75	5,9517	5,9577	0,741	5,667	
100	9,9065	9,9164	1,267	9,689	
125	14,8089	14,8237	1,926	14,729	
150	20,3231	20,3434	2,716	20,771	
175	27,7560	27,7838	3,638	27,822	
200	35,9510	35,9870	4,690	35,867	
225	45,4310	45,4765	5,871	44,899	
250	56,2530	56,3093	7,182	54,924	
275	68,5510	68,6196	8,623	65,945	
300	82,3230	82,4054	10,190	77,928	

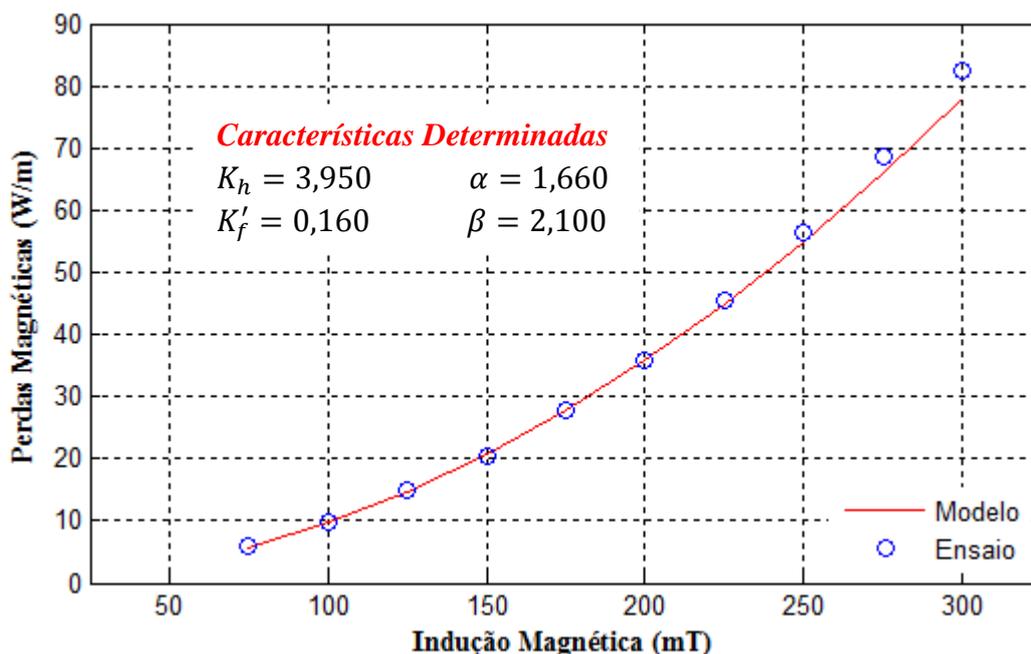


Figura 4.8 – Perdas magnéticas, à 60 Hz, da cantoneira 5 em função da máxima indução magnética; ajuste do modelo aos dados obtidos pelo ensaio.

4.4.4. Cantoneira 06

Tabela 4.5 – Perdas magnéticas da amostra 6 e parâmetros de ajuste relativos ao modelo.

Perdas magnéticas em cantoneiras de aço					
Amostra	Cantoneira 06 - Aço galvanizado para torres			Características Determinadas	
Frequência	60 Hz	Massa Total	7,455 kg	K_h	3,430
Comprimento Total	1,001 m	Massa Efetiva	7,455 kg	K'_f	0,164
Comprimento Efetivo	1,001 m	Bobina	700 espiras	α	1,608
Massa Específica	7802 kg/m ³	Área	954,6 mm ²	β	2,170
Resultados experimentais - Leituras			Calculados		
Indução Magnética (mT)	Ptot (W)	Ptot (W/m)	Ptot (W/kg)	Ptot (W/m)	
75	5,5585	5,5529	0,717	5,339	
100	9,2721	9,2628	1,219	9,079	
125	13,8683	13,8544	1,847	13,756	
150	19,4124	19,3930	2,603	19,387	
175	25,9920	25,9660	3,485	25,956	
200	33,6880	33,6543	4,494	33,470	
225	42,6880	42,6454	5,631	41,939	
250	52,7090	52,6563	6,896	51,360	
275	64,1120	64,0480	8,290	61,742	
300	77,0100	76,9331	9,813	73,085	

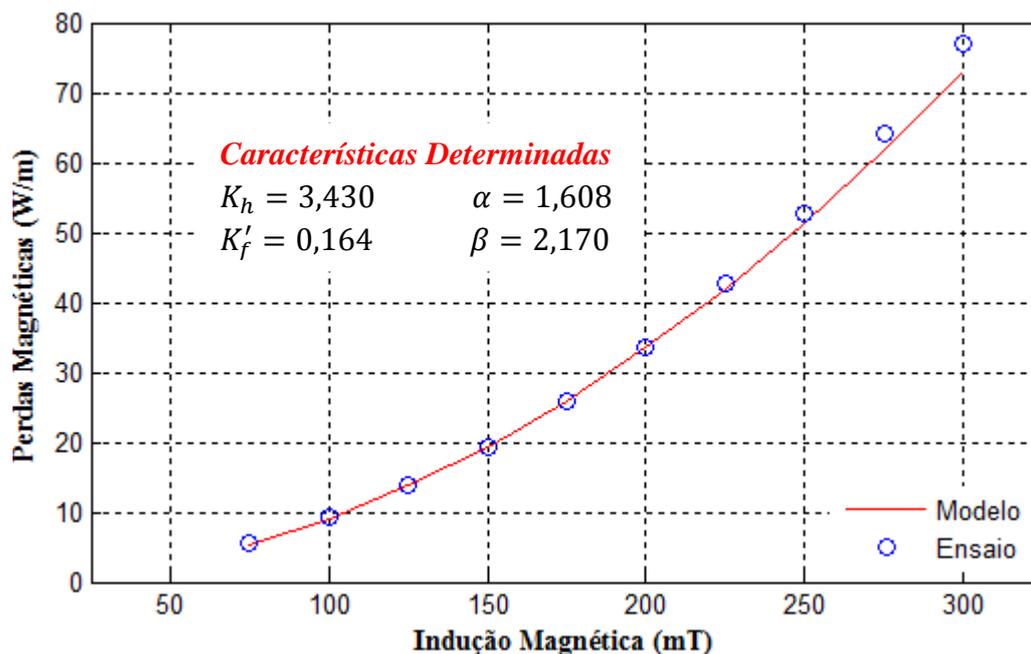


Figura 4.9 – Perdas magnéticas, à 60 Hz, da cantoneira 6 em função da máxima indução magnética; ajuste do modelo aos dados obtidos pelo ensaio.

4.4.5. Parâmetros característicos de perdas magnéticas nas amostras

A tabela 4.6 mostra média e o desvio padrão dos parâmetros K_h , α , K'_f e β , obtidos para cada amostra, nos ensaios realizados na gama $40 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$. Pela média dos parâmetros, obteve-se as características do modelo de perdas magnéticas proposto para o conjunto de cantoneiras. Os parâmetros K_h e K'_f foram expressos em $[W/m]$ e em $[W/kg]$.

Tabela 4.6 – Parâmetros que caracterizam as perdas magnéticas nas amostras [13].

Amostra	Seção Transversal (mm ²)	Parâmetros de perdas histeréticas			Parâmetros de perdas parasíticas		
		Constante K_h		Expoente α	Constante K'_f		Expoente β
		(W/m)	(W/kg)		(W/m)	(W/kg)	
Cantoneira 01	939,2	3,7260 ± 0,0110	0,5085 ± 0,0015	1,6610 ± 0,0057	0,187 ± 0,037	0,0255 ± 0,0051	2,203 ± 0,019
Cantoneira 02	987,9	3,6466 ± 0,0066	0,47311 ± 8,6 E-04	1,6032 ± 0,0034	0,167 ± 0,035	0,0217 ± 0,0045	2,16 ± 0,018
Cantoneira 03	987,9	3,759 ± 0,024	0,4877 ± 0,0031	1,5540 ± 0,0120	0,1550 ± 0,0490	0,0201 ± 0,0064	2,336 ± 0,025
Cantoneira 04	934,6	3,3959 ± 0,0084	0,46570 ± 0,00110	1,6013 ± 0,0043	0,212 ± 0,021	0,0291 ± 0,0029	2,251 ± 0,011
Cantoneira 05	980,2	3,9480 ± 0,0110	0,51620 ± 0,00140	1,6646 ± 0,0055	0,161 ± 0,039	0,0211 ± 0,0051	2,104 ± 0,020
Cantoneira 06	954,6	3,4301 ± 0,0059	0,46057 ± 8,0 E-04	1,6079 ± 0,0031	0,164 ± 0,031	0,0220 ± 0,0042	2,17 ± 0,016
Cantoneira 07	1063,8	4,2776 ± 0,0072	0,51537 ± 8,7 E-04	1,5920 ± 0,0037	0,210 ± 0,034	0,0253 ± 0,0040	2,202 ± 0,017
Cantoneira 08	979,8	3,5290 ± 0,0160	0,46160 ± 0,00200	1,5922 ± 0,0080	0,174 ± 0,036	0,0228 ± 0,0047	2,165 ± 0,018
Cantoneira 09	955,5	3,8493 ± 0,0041	0,51634 ± 5,5 E-04	1,6438 ± 0,0021	0,159 ± 0,030	0,0213 ± 0,0040	2,144 ± 0,015
Cantoneira 10	958,4	3,7441 ± 0,0090	0,50070 ± 0,00120	1,6415 ± 0,0047	0,158 ± 0,034	0,0211 ± 0,0046	2,136 ± 0,017
Cantoneira 11	960,7	3,3097 ± 0,0051	0,44159 ± 6,8 E-04	1,5814 ± 0,0026	0,166 ± 0,031	0,0221 ± 0,0042	2,192 ± 0,016
Média	1070,3	3,69 ± 0,29	0,486 ± 0,028	1,619 ± 0,031	0,176 ± 0,039	0,0232 ± 0,0051	2,173 ± 0,045
Modelo	$P_{tot} = (K_h \cdot f \cdot B_m^\alpha + K'_f \cdot f^2 \cdot B_m^\beta)$						
Observações	P_{tot} - perdas magnéticas, em W/m ou W/kg		f - frequência em Hz		B_m - máxima indução magnética, em T		

As equações 4.5 e 4.6 apresentam o modelo proposto para as perdas magnéticas nas amostras ensaiadas.

$$P_{tot} = 3,69 \cdot f \cdot B_m^{1,619} + 0,176 \cdot f^2 \cdot B_m^{2,173} \quad [W/m] \quad (4.5)$$

$$P_{tot} = 0,486 \cdot f \cdot B_m^{1,619} + 0,0232 \cdot f^2 \cdot B_m^{2,173} \quad [W/kg] \quad (4.6)$$

4.5. Análise dos resultados

Existem muitos parâmetros que influenciam as perdas magnéticas, tanto na sua natureza como no processo de medida. Quando se realiza a modelagem e a medição, deve-se atuar com critérios rigorosos quando da influência de parâmetros e fenômenos supostamente de serem negligenciados. A modelagem das perdas magnéticas em chapas ferromagnéticas é um assunto complexo e ainda não definitivamente resolvido, razão pela qual muito tem se discutido entre pesquisadores que atuam nesta linha de pesquisa.

Para enfatizar, este trabalho não contemplou a execução dos ensaios e nem proposta do modelo de perdas para as cantoneiras. O principal objetivo desta análise é verificar as condições de aplicação que o modelo se adapta. Desta forma, para fazer uma análise entre os valores obtidos nos ensaios e modelo proposto para caracterizar as perdas magnéticas nas cantoneiras, foi feito um gráfico que mostra a tendência do desvio entre as medidas de ensaio e os valores obtidos através do modelo. No gráfico, ilustrado na figura 4.10, são apresentadas as curvas de desvio absoluto entre os valores das medidas efetuadas e os valores obtidos pelo modelo.

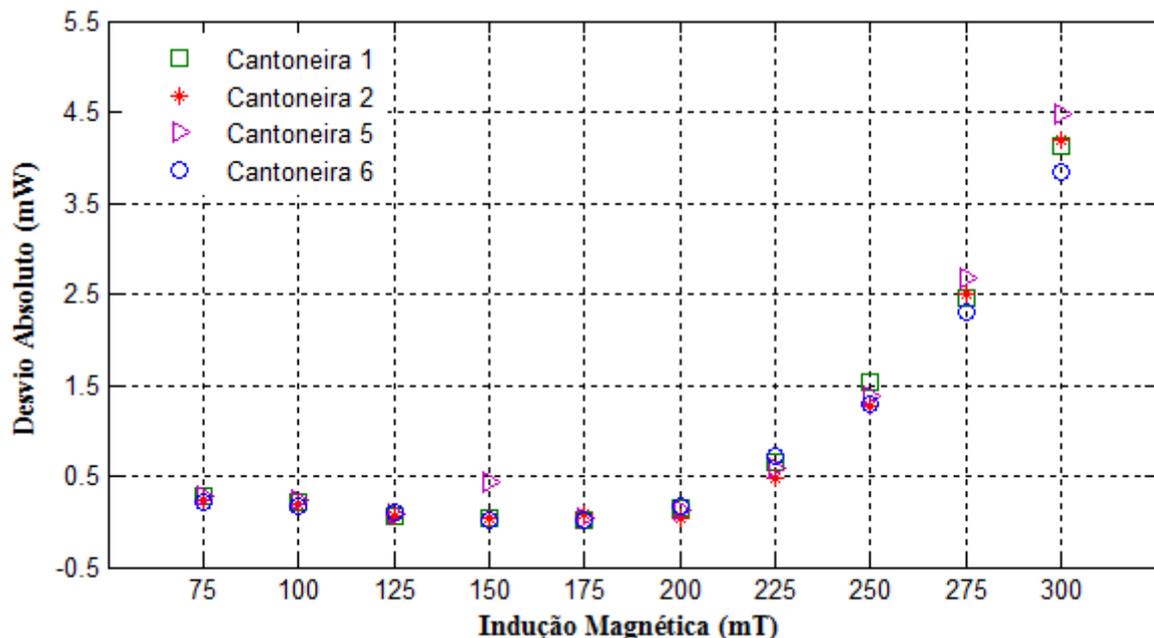


Figura 4.10 – Desvios absolutos entre os valores de ensaio e os valores obtidos através do modelo proposto. São mostradas as curvas de desvio para as cantoneiras 01, 02, 05 e 06.

Analisando as curvas mostradas através do gráfico ilustrado na figura 4.10 verifica-se que o comportamento do desvio para as 4 amostras é semelhante. Para o regime de indução que compreende o intervalo de 75 mT a 200 mT, o modelo parece ser de grande efetividade em tornar evidente possíveis imprecisões, tanto de caráter experimental como, até mesmo, no próprio modelo dos fenômenos em questão. Para o regime de indução que compreende o intervalo de 200 mT a 300 mT os valores equivalentes ao modelo começam a divergir das perdas obtidas nos ensaios. Contudo, para a aplicação do modelo neste trabalho, esta última verificação pode não ser relevante. Caberá investigar se a aplicação do modelo estará sujeita a regimes de indução acima de 200 mT.

CAPÍTULO 5

Ensaio para o Levantamento da Curva B_m-H_m

Os modelos matemáticos que apresentam as características de perdas magnéticas em materiais são expressos em função da máxima indução à qual os materiais são submetidos.

A curva B_m-H_m do material que compõe as cantoneiras é uma característica imprescindível para que seja determinado o comportamento da máxima indução magnética no material em função da máxima intensidade campo magnético à qual é submetido e, conseqüentemente, as suas perdas magnéticas.

Neste contexto, este capítulo contempla o levantamento da curva B_m-H_m do material que compõe as cantoneiras.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel, pelo pesquisador Márcio Antônio Sens.

5.1. Levantamento da curva B_m-H_m

Neste tópico serão apresentados os procedimentos realizados para obter a curva B_m-H_m do material que compõe as cantoneiras, os resultados obtidos e uma análise, visando estabelecer um modelo de curva que se adapta às condições de uso deste trabalho.

5.1.1. Fundamentos teóricos

As grandezas elétricas associadas à relação entre a indução magnética e o campo magnético em um material são tensão e corrente. Nos materiais ferromagnéticos, como visto no capítulo 1 deste trabalho, esta relação não é linear.

Um método clássico utilizado para obter a curva de magnetização inicial de uma amostra do material, é o método do anel de Rowland. Este método, utilizado em 1873 [18], foi proposto pelo físico norte americano Henry Augustus Rowland (1848-1901).

O anel de Rowland consiste em um anel toroidal coberto uniformemente por uma bobina magnetizadora e uma bobina sensora concentrada em um pólo do anel. Quando uma corrente variável no tempo circula pela bobina magnetizadora, um campo magnético é produzido na amostra do material. Na presença deste campo, faz-se fluir pela amostra um fluxo magnético, que por sua vez, induz uma tensão entre os terminais da bobina sensora. A

tensão induzida na bobina sensora é diretamente proporcional a taxa de variação temporal do fluxo magnético produzido.

Uma formulação simplista e eficaz para descrever os fenômenos pode ser feita sob as seguintes suposições:

- i. a amostra sob análise consiste de uma material ferromagnético cuja permeabilidade seja muito maior que a do ar. Sendo assim, supõe-se que o fluxo magnético seja confinado aos caminhos delimitado pela amostra;
- ii. a origem do campo magnético produzido é apenas a densidade de corrente que circula pela bobina.

Considerando estas suposições, o fenômeno descrito pode ser traduzido pelas equações (5.1) e (5.2) apresentadas a seguir.

$$H(t) = \frac{N_1 i_1(t)}{l_{\text{médio}}} \quad [A/m] \quad (5.1)$$

Onde,

$H(t)$ representa o valor, expresso em amperes por metro, do campo magnético produzido pelos amperes-espiras;

N_1 representa o número de espiras da bobina de magnetização;

$i_1(t)$ representa o valor, expresso em amperes, da corrente que circula pela bobina de magnetização;

$l_{\text{médio}}$ representa o valor médio, expresso em metros, do perímetro do anel.

$$V_2(t) = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad [V] \quad (5.2)$$

Onde,

$V_2(t)$ representa o valor, expresso em volts, da tensão induzida na bobina sensora;

N_2 representa o número de espiras da bobina sensora;

$\phi(t)$ representa o valor, expresso em weber, do fluxo magnético que circula na amostra do material.

A indução magnética B é a imagem da tensão induzida na bobina sensora. O desenvolvimento matemático a seguir formula como estas grandezas, tensão e indução, estão relacionadas.

Partindo da equação (5.2), tem-se

$$\phi(t) = \frac{1}{N_2} \int V_2(t) dt \quad [Wb] \quad (5.3)$$

Por sua vez, o fluxo magnético que atravessa uma superfície S é definido como

$$\phi(t) = \int_S \mathbf{B}(t) \cdot d\mathbf{S} \quad [Wb] \quad (5.4)$$

em que $\mathbf{B}(t)$ representa o vetor indução magnética, expresso em weber por metro quadrado ou em tesla, e $d\mathbf{S}$, expresso em metros quadrados, representa o vetor diferencial de orientação da superfície S . Neste caso, o operador (\cdot) representa o produto escalar entre os vetores $\mathbf{B}(t)$ e $d\mathbf{S}$.

Considerando que $\mathbf{B}(t)$ seja uniforme na superfície S e que esta possua a mesma orientação do vetor $\mathbf{B}(t)$, a equação (5.4) pode ser reduzida à forma escalar, como mostra a equação (5.5).

$$\phi(t) = B(t) \cdot S \quad [Wb] \quad (5.5)$$

Relacionando as equações (5.3) e (5.5), tem-se

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \int V_2(t) dt \quad [T] \quad (5.6)$$

Desta forma, conclui-se que a indução magnética é diretamente proporcional à integral no tempo da tensão que é induzida na bobina sensora.

Para fins práticos, o interessante é ter-se uma relação que permita obter valores máximos de indução magnética através de medidas de tensão no enrolamento sensor. Sendo assim, torna-se necessário a utilização de uma relação que envolva valores eficazes de tensão, os quais podem se medidos por voltímetros sensíveis ao valor eficaz ou apresentados pelos voltímetros sensíveis ao valor médio retificado.

Considerando que a indução magnética na amostra seja de natureza puramente senoidal, pode-se representá-la pela equação (5.7) a seguir.

$$B(t) = B_m \text{sen}(wt) \quad [T] \quad (5.7)$$

A partir das equações (5.5) e (5.2) tem-se,

$$\phi(t) = SB_m \text{sen}(wt) \quad [Wb] \quad (5.8)$$

$$V_2(t) = B_m N_2 S \frac{d}{dt} \text{sen}(wt) \quad [V] \quad (5.9)$$

Desenvolvendo a equação (5.9), encontra-se a seguinte relação:

$$V_2(t) = B_m w N_2 S \text{cos}(wt) \quad [V] \quad (5.10)$$

O valor eficaz de uma onda senoidal é dado pela sua amplitude dividida por $\sqrt{2}$. Sendo assim, o valor eficaz da tensão que é induzida no enrolamento sensor será dado por:

$$V_2 = \frac{B_m w N_2 S}{\sqrt{2}} \quad [V] \quad (5.11)$$

Como w , expresso em radianos por segundo, é igual a $2\pi f$, sendo f a frequência do sistema, tem-se que a indução máxima em função da tensão eficaz é dada pela equação (5.12), como mostrada abaixo.

$$B_m = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \frac{V_2}{N_2 f S} \quad [T] \quad (5.12)$$

Em sua forma mais comumente utilizada, a equação 5.12 pode ser reescrita como:

$$B_m = \frac{V_2}{4,44 N_2 f S} \quad [T] \quad (5.13)$$

Supondo que o ponto de máxima intensidade de campo magnético H esteja em fase com o ponto de máxima indução magnética B , a curva de B_m - H_m pode ser levantada através dos pares ordenados que representem suas amplitudes correspondentes a cada excitação, ou seja, $(B_m, H_m)|_{\text{excitação}}$. Neste caso, a amplitude da intensidade de campo magnético pode ser calculada, a partir da equação 5.1, em função do valor eficaz da corrente de excitação que circula pela bobina magnetizadora. Desta maneira, tem-se a seguinte relação para H_m :

$$H_m = \frac{\sqrt{2} N_1 I_1}{l_{\text{médio}}} \quad [A/m] \quad (5.14)$$

sendo I_1 , o valor eficaz da corrente que faz-se circular pela bobina magnetizadora.

O valor médio do perímetro do anel, $l_{médio}$, pode ser calculado utilizando as medidas dos diâmetros interno e externo do anel toroidal, conforme apresentado pela equação (5.15).

$$l_{médio} = \frac{\pi}{2}(D_1 + D_2) \quad [m] \quad (5.15)$$

Onde D_1 e D_2 , expressos em metros, representam os diâmetros interno e externo, respectivamente.

5.1.2. Bancada experimental

Para o levantamento da curva foram retiradas duas amostras toroidais de cada extremidade, em ambas as abas, de umas das cantoneiras, formando um toróide com diâmetro interno igual a 40 mm, diâmetro externo igual a 65 mm e área efetiva de 291 mm². O conjunto, formado pelas quatro amostras sobrepostas, teve a área efetiva determinada pelo procedimento descrito pela norma NBR 5161 [17]. Posteriormente foram colocadas duas bobinas, primária e secundária, de fio esmaltado de cobre, ao longo da superfície da amostra toroidal. A figura 5.1 ilustra o anel toroidal, composto pelo conjunto das quatro arruelas metálicas, e as bobinas: primária e secundária. A bobina primária, denominado também por bobina de magnetização, foi constituída por 5 espiras e a secundária, denominada bobina sensora, por 320 espiras.

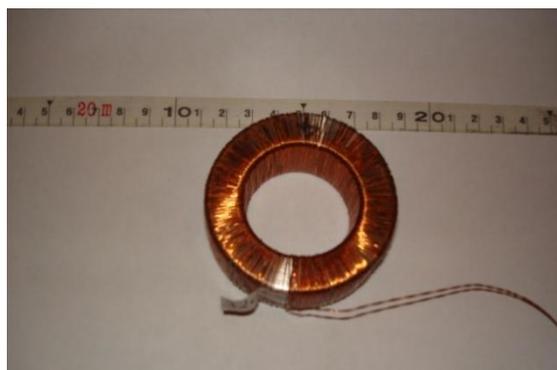


Figura 5.1 – Amostra toroidal com as bobinas: primária e secundária.

A figura 5.2 ilustra o circuito utilizado para a realização das medições de corrente, na bobina de magnetização, e de tensão induzida, na bobina sensora. Os instrumentos utilizados para as medidas de corrente e tensão foram, respectivamente, um multímetro digital modelo

HP 973A [19] e um voltímetro digital modelo HP 3465A [20]. O ajuste da corrente foi feito através de um variac ligado à rede de 220 V.

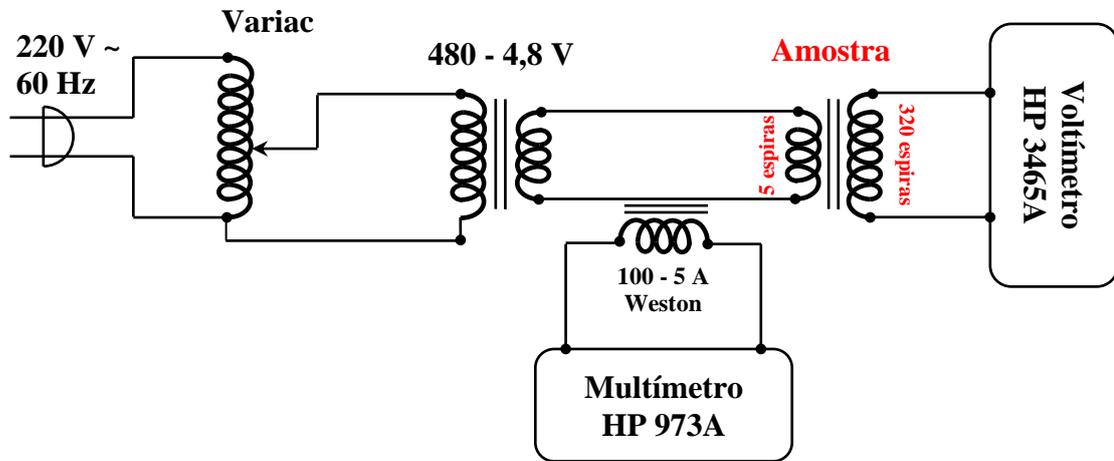


Figura 5.2 – Ilustração do circuito utilizado no levantamento da curva B_m - H_m da amostra do material.

5.1.2. Resultados experimentais

A seguir é apresentada a tabela que contém os valores referentes às medições de corrente e tensão, obtidas pelos instrumentos, e os correspondentes resultados, obtidos por meio de cálculo, para o campo magnético e a indução magnética na amostra do material sob ensaio. Os cálculos do campo magnético e da indução magnética foram realizados através das equações 5.13 e 5.24, respectivamente.

Tabela 5.1 – Medidas experimentais e resultados obtidos.

Corrente (A)	Tensão Induzida (V)	Campo Magnético (A/m)	Indução Magnética (T)
1,0	0,18	42,87	0,00709
2,0	0,38	85,74	0,0153
3,0	0,61	128,62	0,0247
4,0	0,87	171,49	0,0352
5,0	1,16	214,36	0,0467
6,0	1,48	257,23	0,0596
7,0	1,83	300,11	0,0737
8,0	2,20	342,98	0,0886
9,0	2,60	385,85	0,1047
10,0	3,03	428,72	0,1221
15,0	5,61	643,08	0,2260
20,0	7,85	857,44	0,3162
25,0	9,94	1071,81	0,4004
30,1	11,80	1290,45	0,4754
35,1	13,40	1504,81	0,5398
40,1	14,90	1719,18	0,6002
45,1	16,20	1933,54	0,6526
50,1	17,50	2147,90	0,7050
55,2	18,70	2366,55	0,7533
60,1	19,80	2576,62	0,7976
65,1	20,90	2790,98	0,8420
69,8	21,90	2992,48	0,8822
80,2	23,80	3438,35	0,9588

5.1.3. Análise dos resultados

A análise dos resultados apresentada nesta seção tem como objetivo apresentar a curva B_m-H_m para a amostra do material e, principalmente, obter um ajuste da curva que satisfaça as condições de uso deste trabalho. Neste contexto, a figura 5.3 apresenta a curva levantada através dos valores de máxima intensidade de campo magnético e de máxima indução magnética expostos na tabela 5.1.

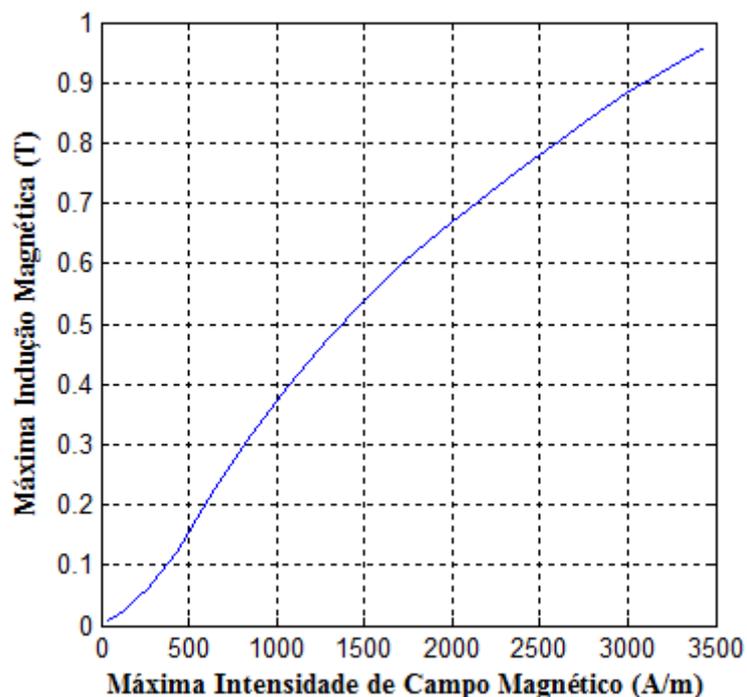


Figura 5.3 – Curva B_m - H_m para a amostra das cantoneiras.

Analisando os dados expostos pela tabela 5.1, verifica-se que a curva foi estabelecida na gama $42,87 \text{ A/m} \leq H \leq 3438,35 \text{ A/m}$. De fato, isto impede o conhecimento do comportamento do material quando sujeito às intensidades de campo magnético inferiores a $42,87 \text{ A/m}$, mas não inviabiliza a capacidade de obter um ajuste da curva que traduza tal comportamento.

A justificativa de obter um ajuste para a curva é estabelecer uma relação matemática que permita o cálculo da máxima indução magnética no material em função da máxima intensidade de campo magnético à qual o mesmo seja submetido. Para garantir um ajuste mais preciso optou-se por estabelecer limites de campo magnético que sejam plausíveis com valores os quais as cantoneiras de uma torre de transmissão de energia estejam sujeitas.

O limite de campo magnético, atribuído como domínio da curva de ajuste, foi estabelecido a partir de uma simulação de um caso hipotético onde a intensidade de campo magnético foi calculada ao longo de um trecho retilíneo, com 28 metros de comprimento, situado a 1 metro de distância acima dos condutores de fase em uma torre de transmissão. A figura 5.4 ilustra a configuração utilizada para o cálculo do campo magnético.

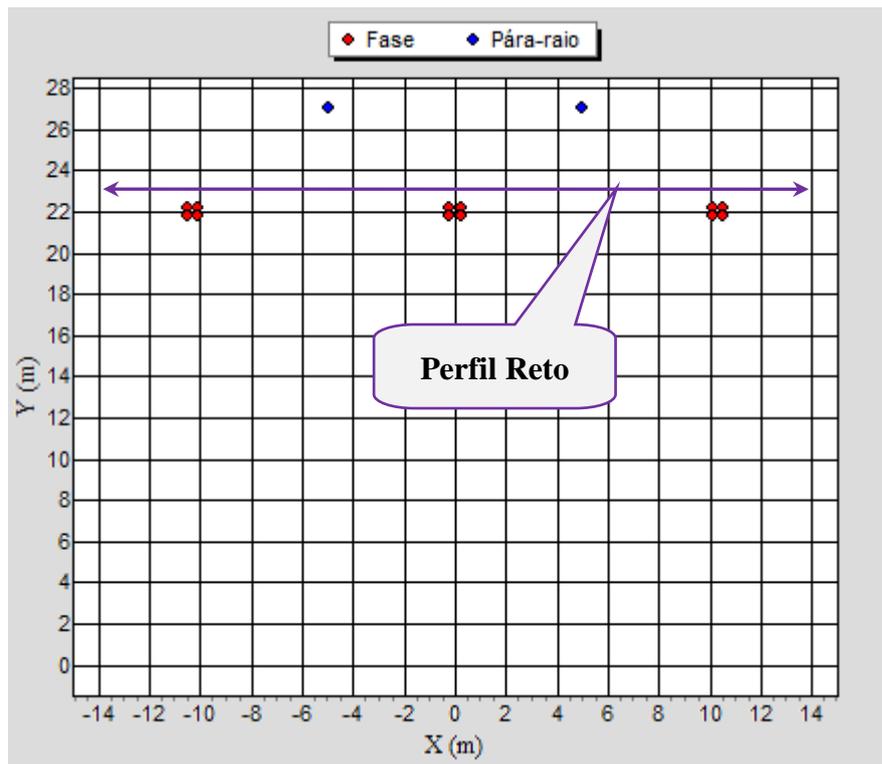


Figura 5.4 – Perfil utilizado para o cálculo do campo magnético.

O valor da corrente de linha utilizado nesta simulação foi de 3000 A e o feixe de condutores, compostos por cabos do tipo Rail, convencional, com subespaçamento de 45,72 cm (18"). Os centros geométricos dos feixes foram dispostos a 22 m do solo com espaçamento entre fases de 10,3 m. A figura 5.5 ilustra a configuração geométrica do feixe descrito.

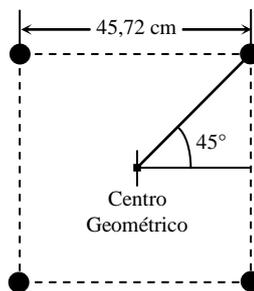


Figura 5.5 – Configuração geométrica do feixe utilizada na simulação.

De certa forma, tanto a posição do trecho escolhido para o cálculo do campo como o valor da corrente de linha, foram escolhidos para garantir uma faixa de ajuste que possa conter qualquer situação real em que as cantoneiras possam estar expostas.

A seguir é apresentado o gráfico que mostra a distribuição das magnitudes máximas de campo magnético ao longo do perfil reto. A curva Campo Total, representa o módulo do campo magnético. As curvas Campo Horizontal e Campo Vertical, representam, respectivamente, o módulo das componentes horizontal e vertical do campo magnético total.

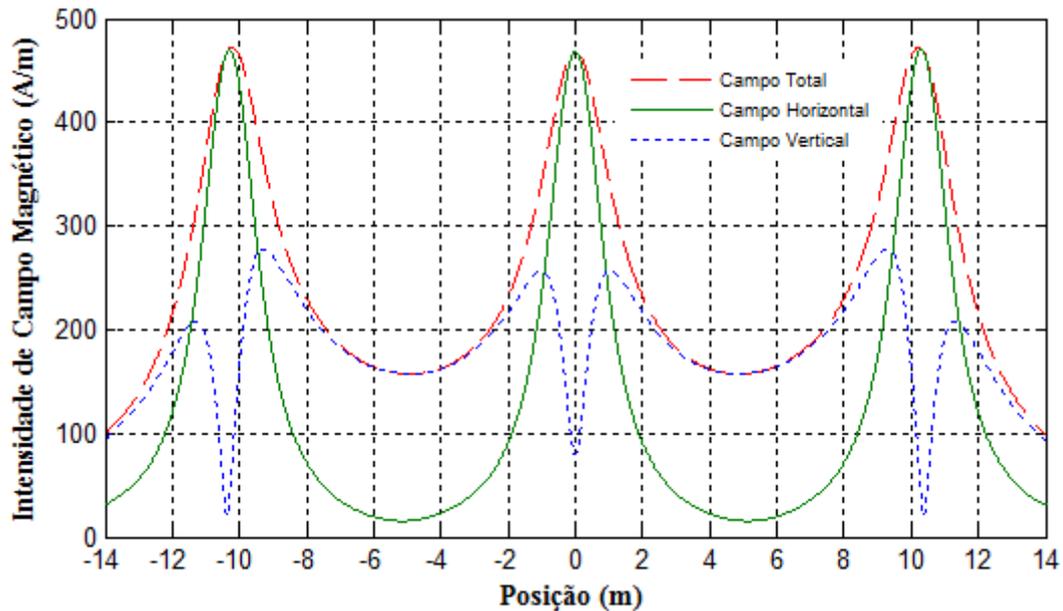


Figura 5.6 – Distribuição do campo magnético ao longo do perfil reto.

O valor da componente horizontal do campo magnético nos trechos das cantoneiras presentes em uma torre de transmissão é o principal interesse para a aplicação do modelo de perdas magnéticas. Como visto, o modelo é baseado em regimes de máxima indução magnética que estejam distribuídos longitudinalmente ao comprimento das cantoneiras. Buscando direcionar o estudo para o cálculo das perdas magnéticas em uma torre de transmissão, o limite de campo magnético, atribuído como domínio da curva de ajuste, foi escolhido com alicerce na magnitude da componente horizontal do campo magnético total sobre o perfil analisado.

O maior valor encontrado para a componente de campo citada anteriormente foi de 470 A/m. Sendo assim, o limite de campo magnético, definido para estabelecer o domínio da curva de ajuste para a relação B_m-H_m do material utilizado no ensaio, foi de 428,72 A/m, que corresponde ao 10^o ponto experimental levantado (vide tabela 5.1). A figura 5.7 apresenta os pontos da curva que está dentro do limite estabelecido para o projeto e a curva de ajuste obtida.

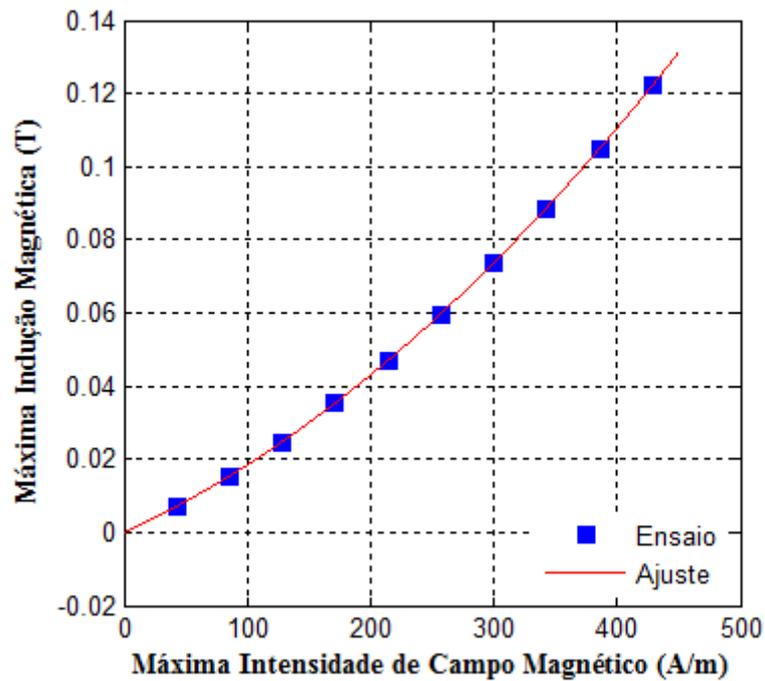


Figura 5.7 – Pontos da curva B_m-H_m , na gama $42,87 \text{ A/m} \leq H \leq 428,72 \text{ A/m}$, referente ao material da amostra sob ensaio, e a curva de ajuste obtida.

O ajuste dos pontos foi realizado utilizando-se uma regressão polinomial de 2ª ordem. A relação entre a máxima indução magnética e a máxima intensidade de campo magnético encontrada é mostrada pela equação (5.16).

$$B_m = 3,0867 \cdot 10^{-7} \cdot H_m^2 + 1,5278 \cdot 10^{-4} \cdot H_m - 6,2441 \cdot 10^{-5} \quad [T] \quad (5.16)$$

CAPÍTULO 6

Metodologia para o Cálculo de Perdas Magnéticas em Cantoneiras sob Regimes de Indução Não Uniformes e Ensaio de Verificação

O modelo para o cálculo das perdas magnéticas do conjunto de cantoneiras se aplica quando as mesmas estão submetidas a um regime de indução magnética uniforme e paralelo ao perfil longitudinal das mesmas. Contudo, em uma torre de transmissão de energia, as cantoneiras que a compõe estão sujeitas a um campo magnético que não as colocam sob estas condições. Ao longo da extensão do material o campo não se apresenta uniforme, ou seja, varia espacialmente. Além disso, a sua orientação espacial varia ponto a ponto, nem sempre sendo paralela ao eixo longitudinal das cantoneiras.

Visando estabelecer uma metodologia de cálculo das perdas magnéticas em uma torre de transmissão, foi feita uma adaptação do modelo de perdas magnéticas, obtido para o conjunto de cantoneiras, que satisfizesse a condição de não uniformidade do campo. Pelas características dimensionais das cantoneiras, as perdas magnéticas são significativas quando a orientação espacial do campo magnético é paralela ao perfil longitudinal das mesmas, o que de fato já é contemplado pelo modelo.

Com o propósito de certificar o modelo adaptado, foi proposto ao Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Cepel a realização de ensaios de perdas magnéticas em um conjunto 4 de cantoneiras. Nestas circunstâncias, as cantoneiras foram dispostas a um campo magnético rotacional, gerado por uma densidade de corrente, de natureza senoidal, em um cabo condutor retilíneo.

6.1. Metodologia de cálculo

A metodologia de cálculo, desenvolvida para calcular as perdas magnéticas em cantoneiras sujeitas a regimes de indução não uniformes, tem como ferramenta base o modelo de perdas obtido para o conjunto de cantoneiras, como apresentado pela equação 4.1. Analisando esse modelo, verifica-se que as perdas dependem da máxima indução magnética à qual o material é submetido. Por sua vez, o modelo se aplica quando a distribuição espacial de

\mathbf{B} é uniforme, sendo este orientado no mesmo sentido do eixo longitudinal da amostra. Nota-se também, que o modelo é expresso em perdas específicas, ou seja, em W/m .

Visando estabelecer um método que contemple a não uniformidade da distribuição espacial de \mathbf{B} no material, o modelo é utilizado sob a forma incremental, ou seja, as perdas são calculadas em cada incremento de comprimento longitudinal da cantoneira.

Para o cálculo da máxima indução magnética em cada incremento, o método consiste em modelar as cantoneiras como elementos cilíndricos, de raio infinitesimal. Sendo assim, considera-se que a máxima indução magnética é uniforme em toda a seção transversal de cada incremento de comprimento longitudinal da cantoneira. Como o comprimento das abas de uma cantoneira é muito menor que o comprimento longitudinal das mesmas, o ponto de referência espacial para o cálculo da indução magnética pode ser considerado como sendo o vértice que liga as suas abas. As figuras 6.1 e 6.2 apresentam, de forma ilustrativa, como as cantoneiras foram modeladas para estabelecer uma metodologia de cálculo da indução magnética no material e, conseqüentemente, de suas perdas magnéticas.

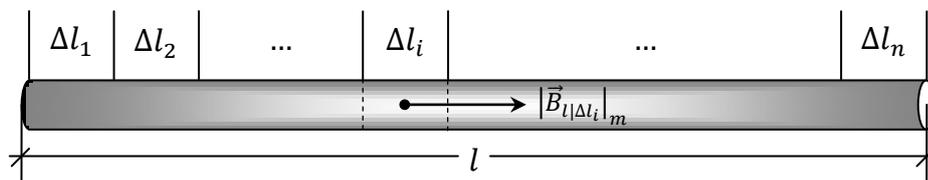


Figura 6.1 – Modelo cilíndrico: uma cantoneira de comprimento l , dividida em n incrementos de comprimento Δl_i com raio infinitesimal, cada qual com sua amplitude longitudinal de indução magnética.

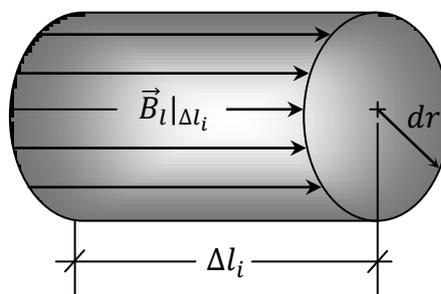


Figura 6.2 – Modelo cilíndrico: distribuição espacial uniforme da indução magnética no elemento cilíndrico de comprimento Δl_i e raio infinitesimal dr .

O vetor $\vec{B}_l|_{\Delta l_i}$ representa a componente longitudinal da indução magnética no incremento Δl_i do material. A amplitude dessa componente, que é de interesse para o cálculo das perdas magnéticas, é representada por $|\vec{B}_l|_{\Delta l_i}|_m$. O índice m foi utilizado para enfatizar que o módulo da componente é o máximo.

Após a modelagem das cantoneiras como elementos cilíndricos, foi estabelecida a seguinte metodologia para o cálculo das perdas magnéticas:

- i. Determina-se o comprimento longitudinal da cantoneira, l ;
- ii. Divide-se o comprimento l em n incrementos;
- iii. A partir do comprimento l e dos n incrementos, obtém-se o comprimento de cada incremento através da seguinte equação:

$$\Delta l_i = \frac{l}{n} \quad [m] \quad (6.1)$$

- iv. Determina-se a amplitude da componente longitudinal da intensidade de campo magnético em cada incremento Δl_i , ou seja, $|\vec{H}_l|_{\Delta l_i}|_m$;
- v. A partir da curva B_m - H_m do material, representada pela equação 5.16, obtém-se o valor da amplitude da componente longitudinal da indução magnética em cada incremento Δl_i ;
- vi. Através dos valores de $|\vec{B}_l|_{\Delta l_i}|_m$, calcula-se o valor das perdas magnéticas em cada incremento Δl_i , utilizando a seguinte equação:

$$\Delta P|_{\Delta l_i} = \left(K_h \cdot f \cdot |\vec{B}_l|_{\Delta l_i}|_m^\alpha + K_f \cdot f^2 \cdot |\vec{B}_l|_{\Delta l_i}|_m^\beta \right) \cdot \Delta l_i \quad [W] \quad (6.2)$$

- vii. Após efetuar o cálculo das perdas para cada incremento, faz-se o somatório de cada parcela determinada, obtendo assim as perdas magnéticas totais na cantoneira de comprimento l .

$$Perdas = \sum_{i=1}^n \Delta P|_{\Delta l_i} \quad [W] \quad (6.3)$$

6.2. Ensaios de verificação

Visando certificar a validade do método elaborado, foram realizados os ensaios para determinar as perdas magnéticas em cantoneiras submetidas a um campo magnético rotacional gerado por uma densidade de corrente em um cabo condutor. A metodologia experimental e a aquisição de dados, utilizadas para determinar as perdas magnéticas nas amostras, foram conforme descrito nos ensaios de caracterização. Contudo, neste caso, o enrolamento de excitação foi constituído por um cabo rígido de alumínio, com comprimento de 5,5 m, diâmetro de 15,88 mm e resistência elétrica de 0,97 m Ω .

Os ensaios foram realizados em duas configurações, denominadas por: “cantoneira solitária” e “janela”. Para cada configuração, foram estabelecidos dois métodos de aquisição das perdas, mais especificamente, da tensão induzida no enrolamento secundário devido ao fluxo magnético variável na amostra. As medidas da tensão induzida no enrolamento secundário foram feitas através do método da bobina de compensação, também utilizado nos ensaios que caracterizaram os parâmetros de perdas do conjunto de cantoneiras, e do método do enrolamento sobre a superfície da amostra, que dispensa o uso da compensação.

Além das medidas de perdas magnéticas, foram realizadas também, apenas por verificação, medidas de resistência elétrica do cabo condutor e de máxima indução magnética no espaço livre.

A seguir são apresentadas as ilustrações dos circuitos utilizados para a determinação das perdas nas amostras. Os circuitos se distinguem apenas pela metodologia adotada na medição da tensão induzida no enrolamento secundário.

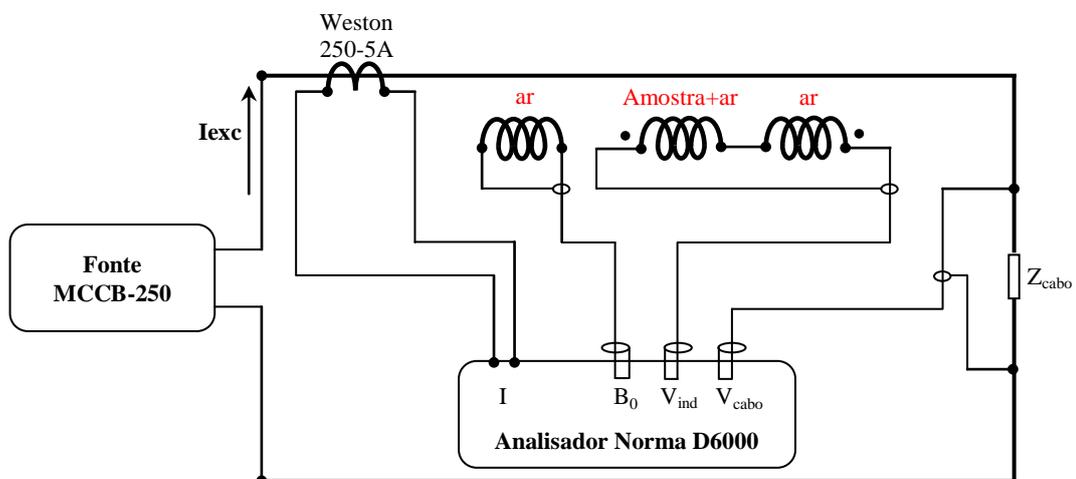


Figura 6.3 – Circuito de ensaio: método da bobina de compensação.

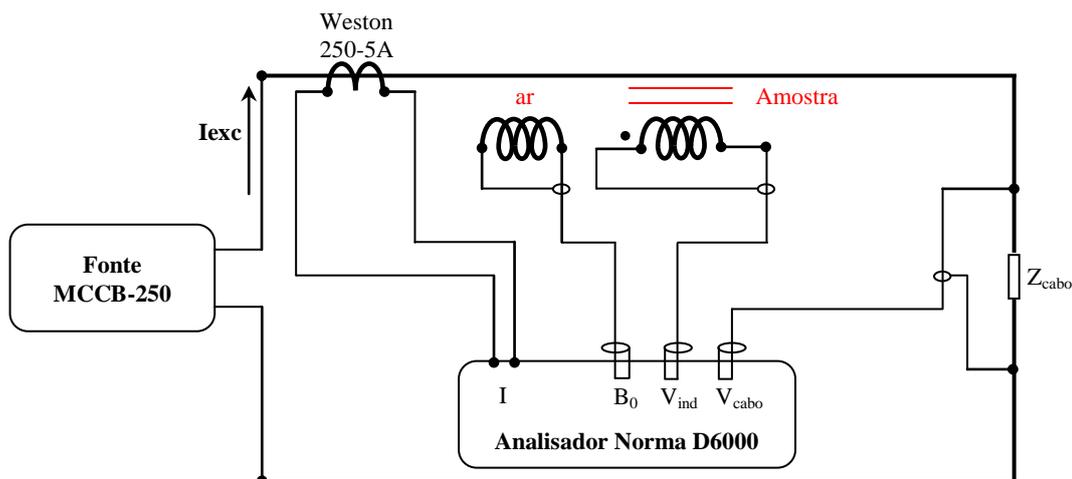


Figura 6.4 – Circuito de ensaio: método do enrolamento sobre a superfície da amostra.

Através do método da bobina de compensação, foram utilizadas, em ambas as configurações, duas bobinas idênticas de diâmetro igual a 34,88 mm, com 261 espiras. Pelo método do enrolamento sobre a superfície da amostra, foi utilizado um enrolamento com 17 espiras, na configuração cantoneira solitária, e um enrolamento com 68 espiras, na configuração janela. Detalhes ilustrativos serão apresentados mais adiante.

A corrente no cabo de excitação foi gerada pela fonte de corrente MCCB-250 [21], produzida pela *Vanguard Instruments Company, Inc.*. Os sinais de corrente, no cabo de excitação, e de tensão induzida enrolamento secundário, foram medidos pelo analisador de potência Norma D6000 [14].

As medidas de máxima indução magnética no espaço livre foram feitas através da aquisição do sinal de tensão induzida em uma bobina sensora de campo com 152 mm de diâmetro e 146 espiras.

6.2.1. Configurações “cantoneira solitária” e “janela”

A configuração “cantoneira solitária” consistiu em um arranjo que permitisse medir as perdas magnéticas em uma cantoneira situada em um plano transversal e perpendicular ao eixo longitudinal do cabo de excitação. Como meio ilustrativo dessa configuração, as figuras 6.3 e 6.4 apresentam o arranjo utilizado, bem como o esquema para a aquisição dos dados. Os arranjos se distinguem pelo método de medição da tensão induzida na amostra.

Em ambos os arranjos, as variáveis de controle para a medição das perdas foram a corrente injetada no cabo condutor e a distância relativa, representada por h , entre o vértice que liga as abas da cantoneira e o cabo condutor. Isto se justifica pelo fato de que a

intensidade de campo magnético na cantoneira varia de acordo com a mudança desses parâmetros e, conseqüentemente, tem-se as variações da indução no material e das perdas magnéticas. De forma concisa, quanto maior a corrente injetada no cabo condutor, maior será a intensidade de campo, e quanto maior a distância relativa entre a cantoneira e o cabo, menor será a indução no material.

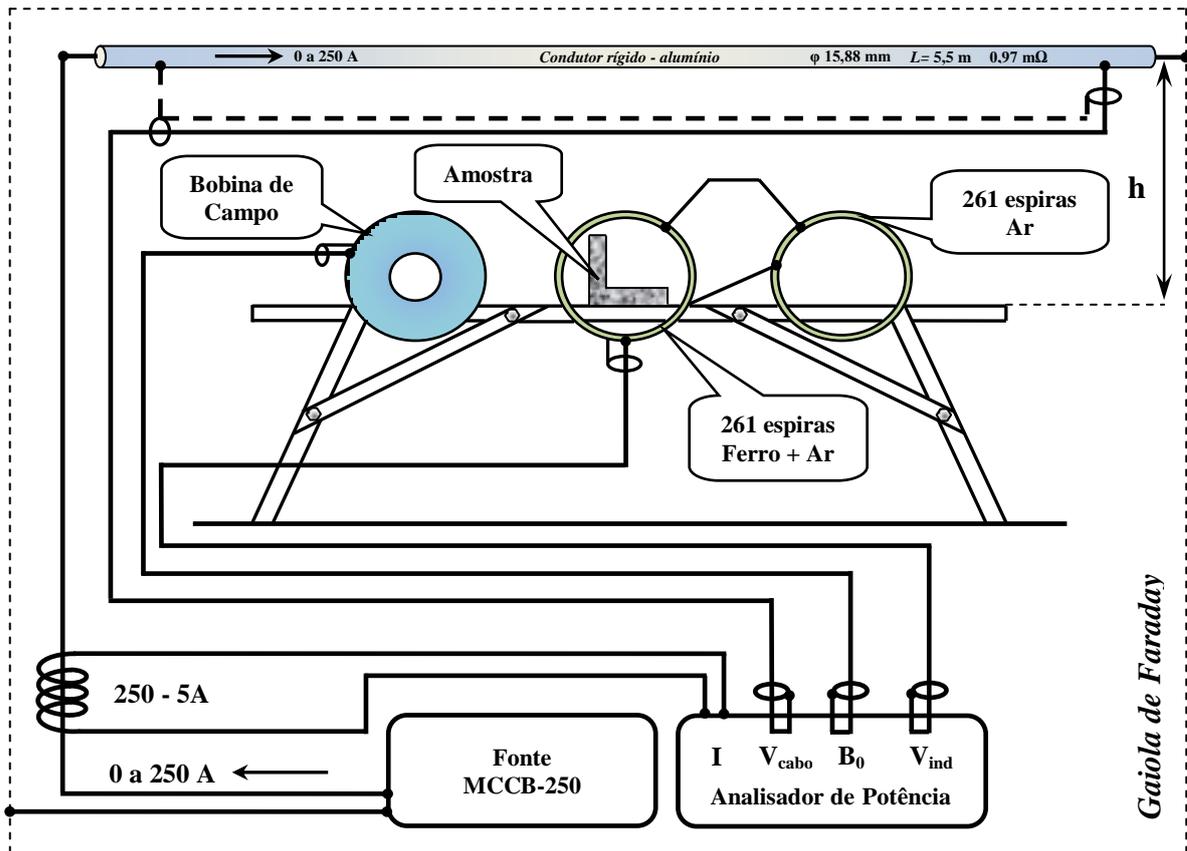


Figura 6.5 – Vista lateral da configuração “cantoneira solitária” utilizando o método da bobina de compensação.

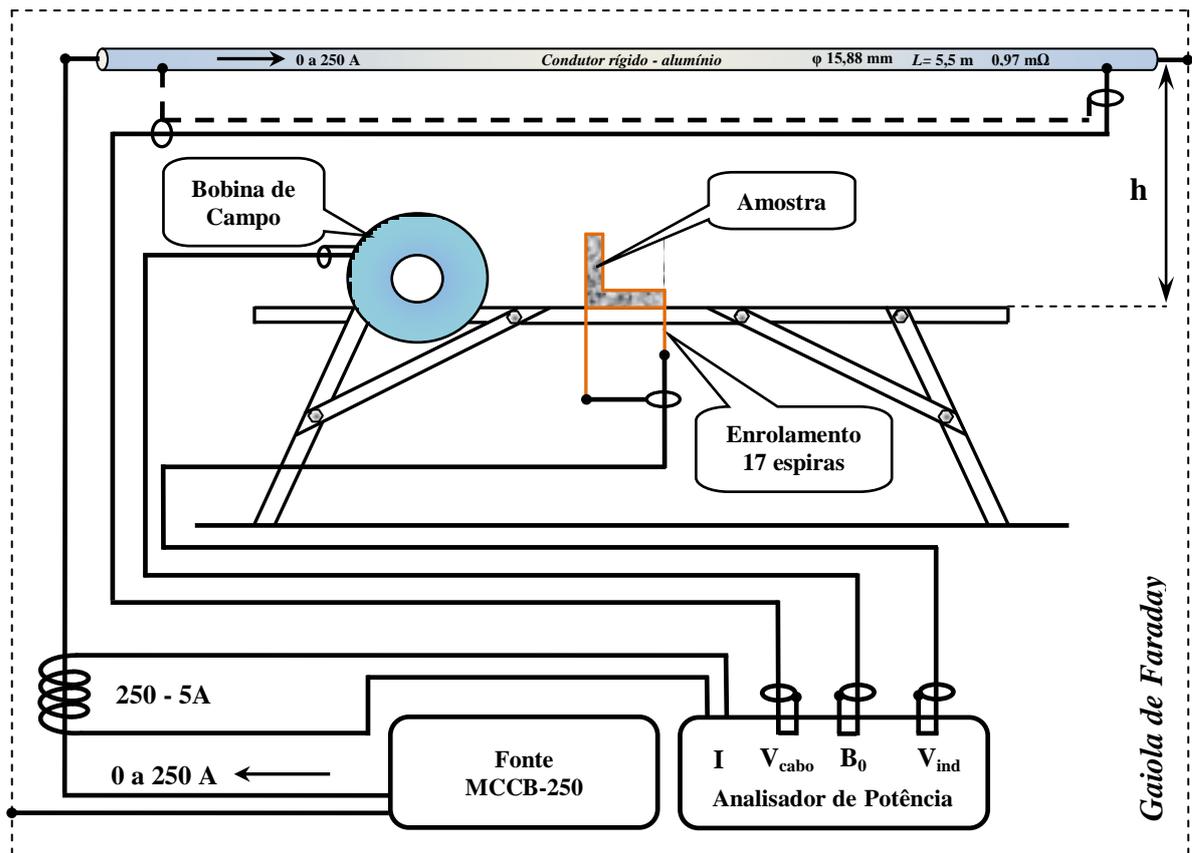


Figura 6.6 – Vista lateral da configuração “cantoneira solitária” utilizando o método do enrolamento sobre a superfície da amostra.

Na configuração janela, foi utilizado um conjunto composto por 4 cantoneiras, de mesmo comprimento, formando um quadro com 4 m de perímetro. Este, por sua vez, teve seu eixo de simetria disposto perpendicularmente ao eixo longitudinal do cabo condutor. O propósito desta configuração foi investigar se as perdas magnéticas se comportariam de forma linear com o número de cantoneiras.

Nesta configuração, a variável de controle, para a medição das perdas magnéticas, foi, apenas, a corrente de excitação, uma vez que a posição relativa entre o cabo e as cantoneiras se manteve constante.

Como meio ilustrativo dessa configuração, as figuras 6.5 e 6.6 apresentam o arranjo utilizado, bem como o esquema para a aquisição dos dados. Os arranjos se distinguem pelo método de medição da tensão induzida na amostra.

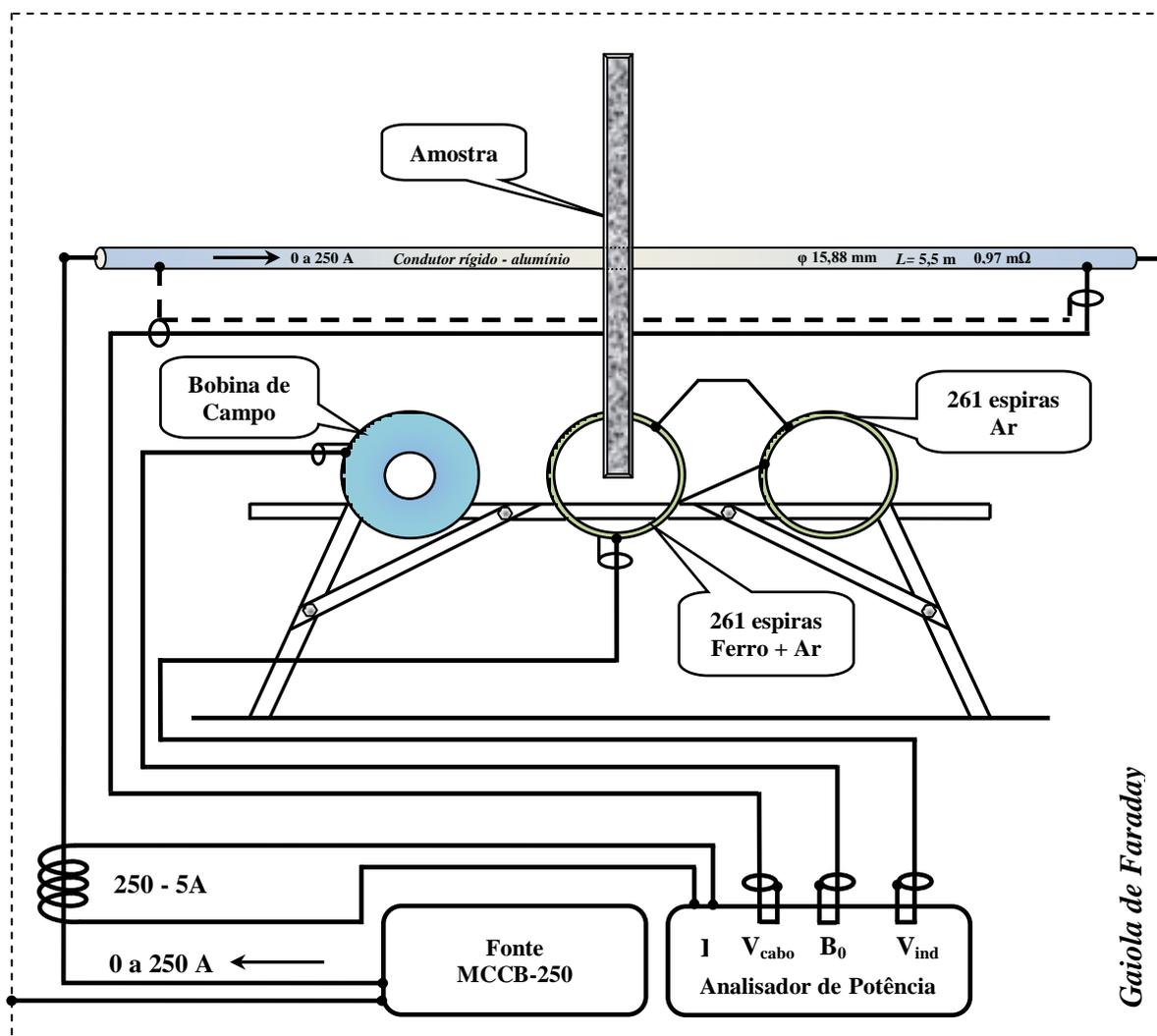


Figura 6.7 – Vista lateral da configuração “janela” utilizando o método da bobina de compensação.

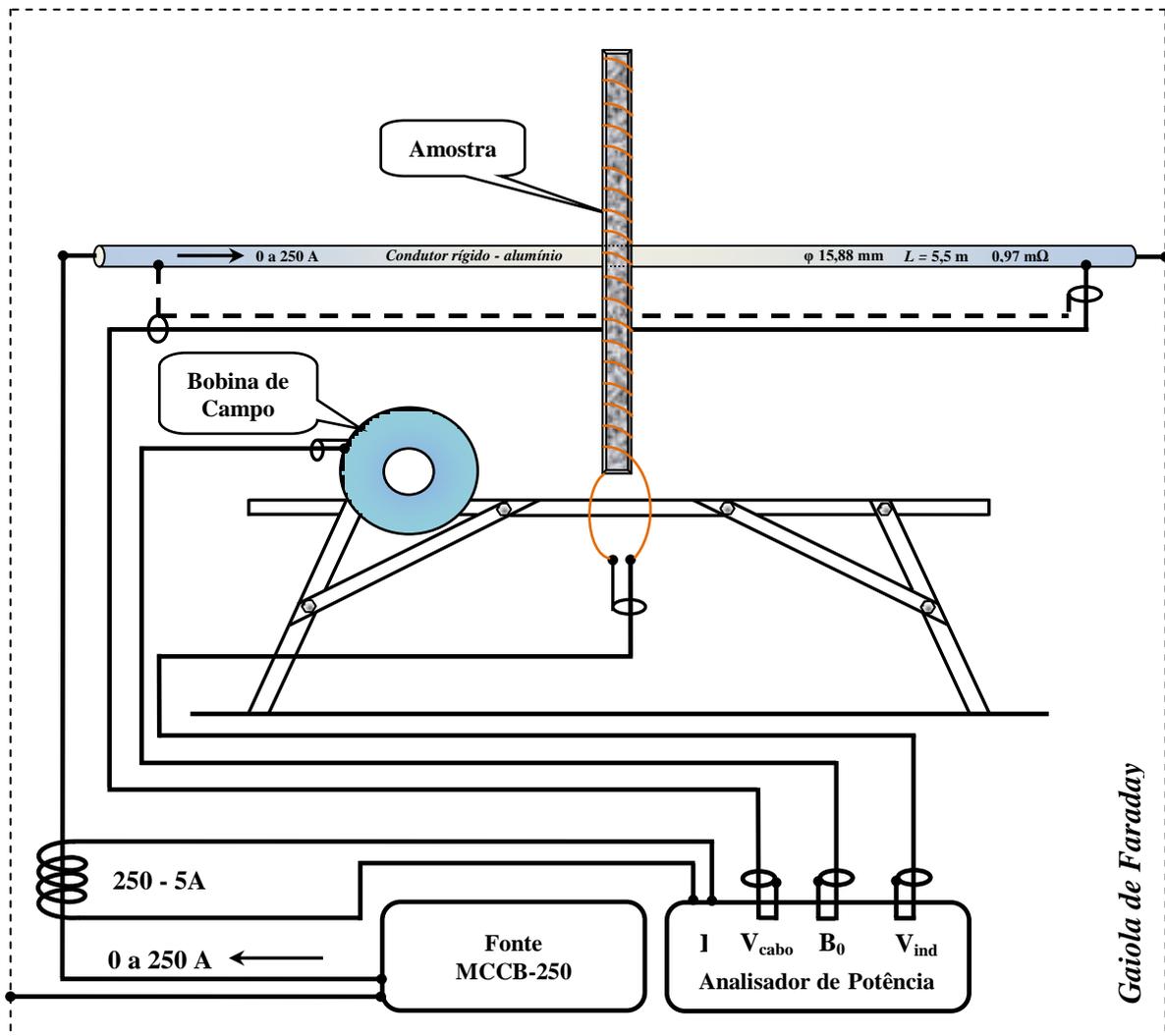


Figura 6.8 – Vista lateral da configuração “janela” utilizando o método do enrolamento sobre a superfície da amostra.

A seguir, são apresentadas as ilustrações, registradas na ocorrência dos ensaios, referentes à instrumentação utilizada e às configurações. Os créditos das figuras são do Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas da Eletrobrás Cepel.

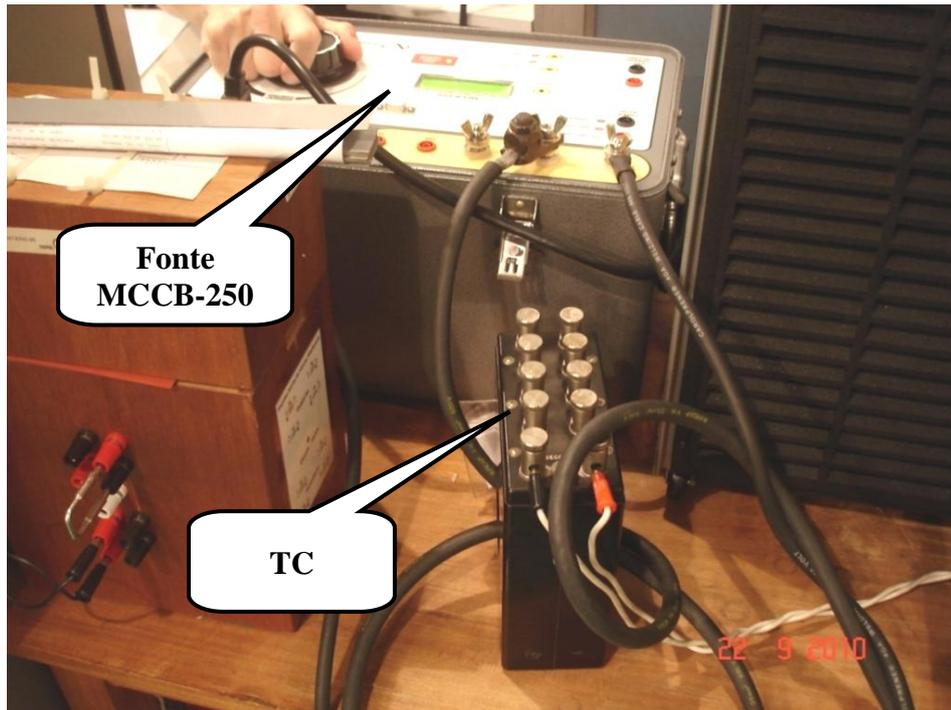


Figura 6.9 – Fonte de corrente modelo MCCB-250; transformador de corrente de relação 250-5A.



(a)



(b)

Figura 6.10 – Aquisição de dados: a) analisador de potência Norma D6000; b) canais de entrada dos sinais de tensão e corrente.

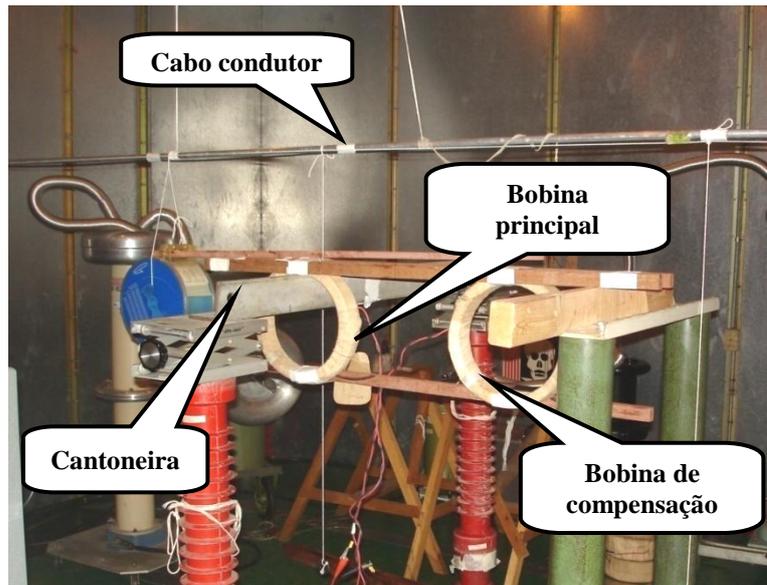


Figura 6.11 – Configuração “cantoneira solitária”: método da bobina de compensação. Nos detalhes tem-se o cabo condutor disposto perpendicularmente ao eixo longitudinal da cantoneira, situada abaixo do mesmo, e a bobina de compensação, utilizada para compensar o fluxo disperso na bobina principal.

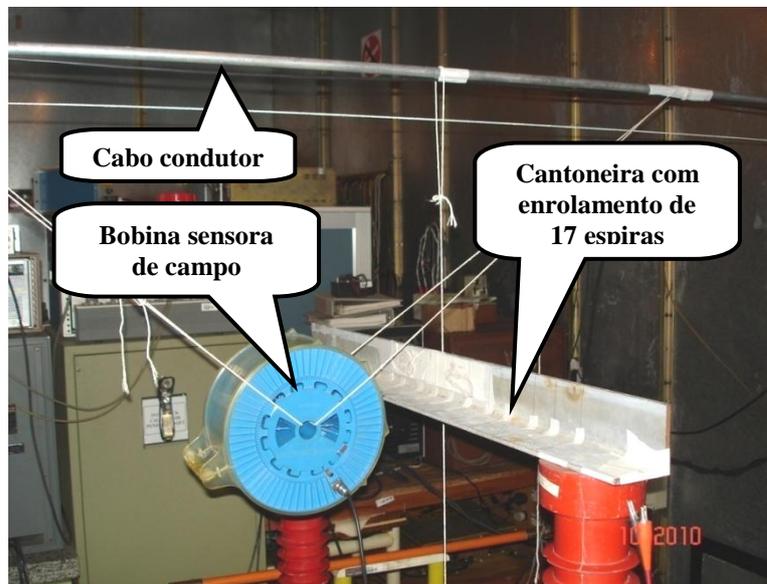


Figura 6.12 – Configuração “cantoneira solitária”: método do enrolamento sobre a superfície da amostra. No detalhe, tem-se a cantoneira, com o enrolamento de 17 espiras, situada abaixo do cabo condutor, ao lado a bobina sensora de campo.

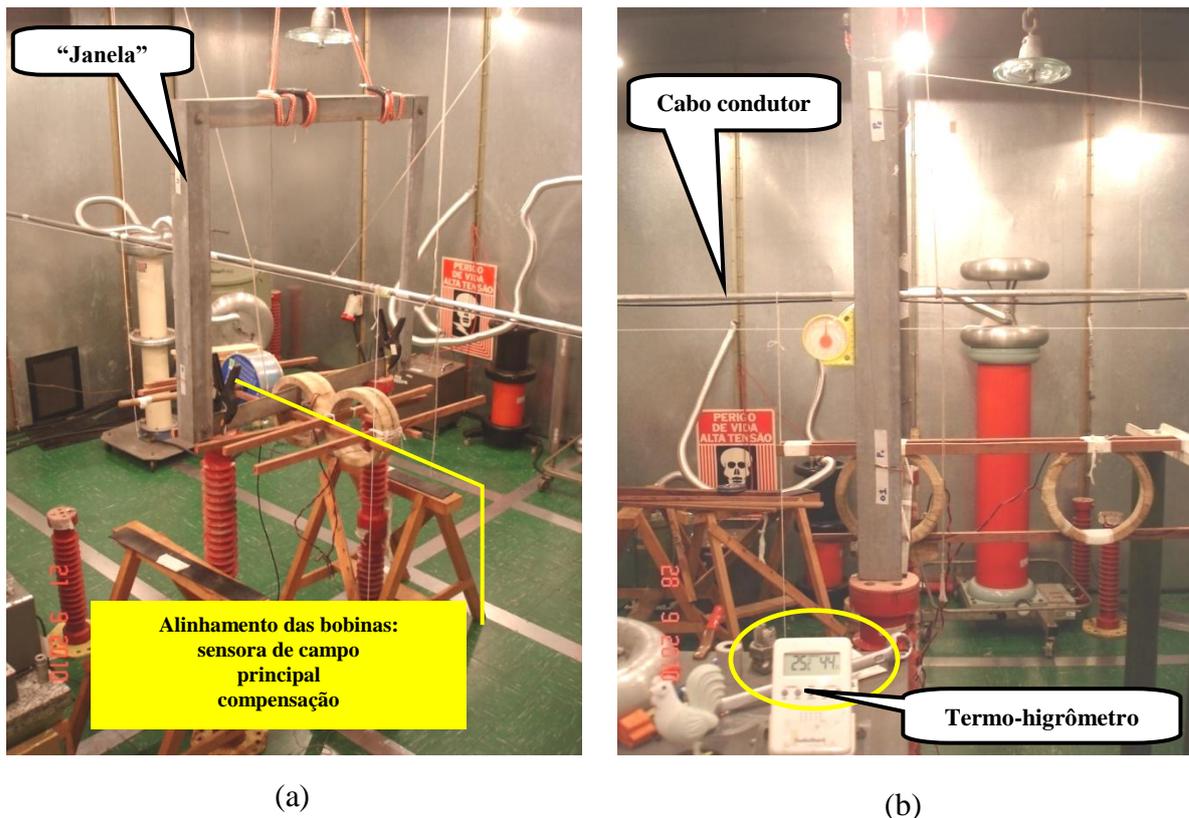


Figura 6.13 – Configuração “janela”: método da bobina de compensação. No detalhe, tem-se: a) o quadro composto por 4 cantoneiras, formando a janela, e o alinhamento entre a bobinas sensora de campo, principal e de compensação; b) vista lateral da configuração e o termo-higrômetro registrando, naquele instante, a temperatura de 25 °C e umidade relativa de 44%.

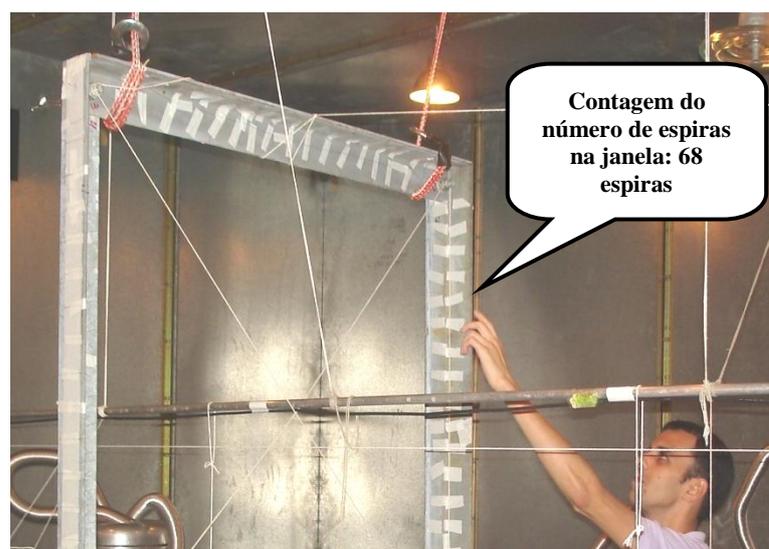
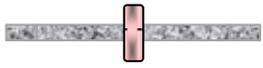


Figura 6.14 – Configuração “janela”: método do enrolamento sobre a superfície da amostra. No detalhe, a contagem do número de espiras na janela.

6.2.2. Resultados experimentais e comparação com a metodologia proposta

Com o intuito de facilitar a identificação dos ensaios realizados e a posterior análise comparativa entre os resultados experimentais e “teóricos”, esta seção foi dividida de acordo com os ensaios realizados, conforme é descrito a seguir:

	Descrição	Configuração/Método
Ensaio 01	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração: cantoneira solitária. Cantoneira situada a 0,35 m do cabo condutor; • Método: bobina de compensação; • Bobina sensora de campo: situada a 0,35 m do cabo condutor. 	<p><i>cabo condutor</i></p> <p>⊙ <i>I</i></p> <p>0,35 m</p>  <p><i>Bobina</i></p>
Ensaio 02	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração: cantoneira solitária. Cantoneira situada a 0,425 m do cabo condutor; • Método: bobina de compensação; • Bobina sensora de campo: situada a 0,425 m do cabo condutor. 	<p><i>cabo condutor</i></p> <p>⊙ <i>I</i></p> <p>0,425 m</p>  <p><i>Bobina</i></p>
Ensaio 03	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração: cantoneira solitária. Cantoneira situada a 0,50 m do cabo condutor; • Método: bobina de compensação; • Bobina sensora de campo: situada a 0,50 m do cabo condutor. 	<p><i>cabo condutor</i></p> <p>⊙ <i>I</i></p> <p>0,50 m</p>  <p><i>Bobina</i></p>
Ensaio 04	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração: cantoneira solitária. Cantoneira situada a 0,50 m do cabo condutor; • Método: enrolamento sobre a superfície da amostra. Enrolamento com 17 espiras; • Bobina sensora de campo: situada a 0,50 m do cabo condutor. 	<p><i>cabo condutor</i></p> <p>⊙ <i>I</i></p> <p>0,5 m</p>  <p><i>Enrolamento</i></p>

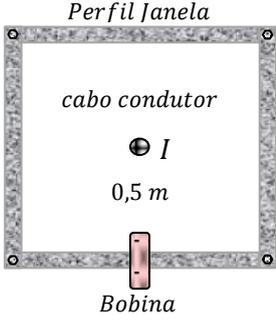
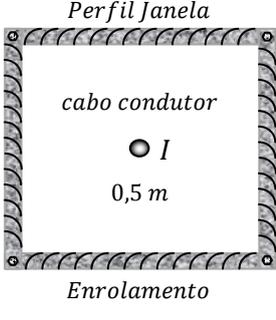
<p style="text-align: center;">Ensaio 05</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração: janela. Cabo condutor disposto no centro do quadro, a 0,50 m de distância das cantoneiras; • Método: bobina de compensação; • Bobina sensora de campo: situada a 0,50 m do cabo condutor 	
<p style="text-align: center;">Ensaio 06</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração: janela. Cabo condutor disposto no centro do quadro, a 0,50 m de distância das cantoneiras; • Método: enrolamento sobre a superfície da amostra. Enrolamento com 17 espiras, distribuídas uniformemente em uma cantoneira do quadro; • Bobina sensora de campo: situada a 0,50 m do cabo condutor. 	
<p style="text-align: center;">Ensaio 07</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração: janela. Cabo condutor disposto no centro do quadro, a 0,50 m de distância das cantoneiras; • Método: enrolamento sobre a superfície da amostra. Enrolamento com 68 espiras, distribuídas uniformemente sobre o quadro. • Bobina sensora de campo: situada a 0,50 m do cabo condutor. 	

Figura 6.15 – Divisão dos ensaios realizados.

Para a aplicação da metodologia de cálculo, como descrita no item 6.1 deste capítulo, os valores das componentes longitudinais de máxima intensidade de campo magnético, $|\vec{H}_{l|\Delta l_i}|_m$, em cada incremento Δl_i , foram obtidos através simulações utilizando-se o software “Campem – Campos Elétricos e Magnéticos” [22], desenvolvido no Departamento de Linhas e Estações da Eletrobrás Cepel. O cálculo de campos elétrico e magnético, adotado pelo Campem, é realizado usando-se uma análise bidimensional e é baseado no método da imagem complexa corrigida [23].

6.2.2.1. Ensaio 01

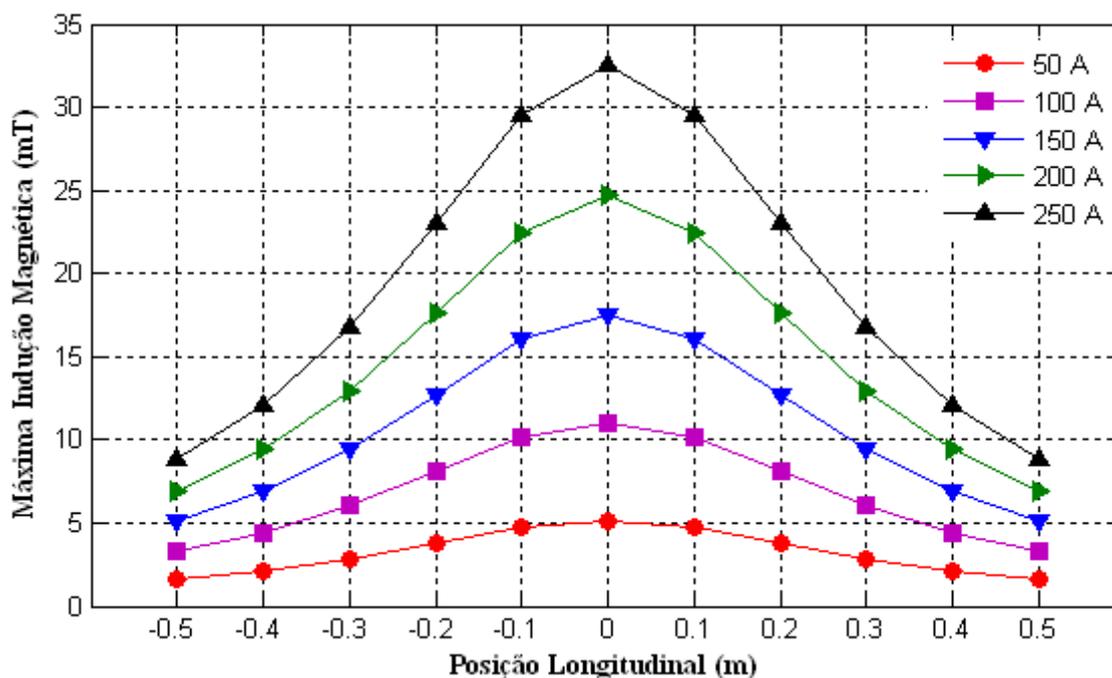


Figura 6.16 – Distribuição espacial, correspondente a 5 níveis de corrente eficaz no cabo condutor, da máxima indução magnética. Espécime sob ensaio: cantoneira 05, situada a 0,35 m do cabo e dividida em 10 incrementos com 0,1 m. Os valores da posição longitudinal tomam como origem o meio da cantoneira.

Tabela 6.1 – Comparação, entre dados experimentais e valores teóricos, das perdas magnéticas na cantoneira e da máxima indução magnética no espaço livre.

Configuração Cantoneira Solitária - Método da Bobina de Compensação				
Amostra: Cantoneira 05		Distância Relativa entre a Cantoneira e o Cabo Condutor: 0,35 m		
Variável de Controle	Perdas Magnéticas (mW)		Indução Magnética (μ T)	
Corrente Eficaz (A)	Modelo	Ensaio	Teórico	Ensaio
50,01	25,04	21,23	40,41	36,19
60,05	35,19	30,89	48,52	43,48
70,06	47,00	42,33	56,61	50,65
80,08	60,54	55,66	64,71	57,92
90,09	75,83	70,94	72,80	65,12
100,07	92,88	88,03	80,86	72,34
120,09	132,68	128,35	97,04	86,87
150,10	207,17	203,39	121,29	108,47
160,07	236,09	232,47	129,34	115,75
180,07	300,72	296,56	145,50	130,14
200,03	374,48	368,65	161,63	144,47
250,02	603,35	588,77	202,02	180,57

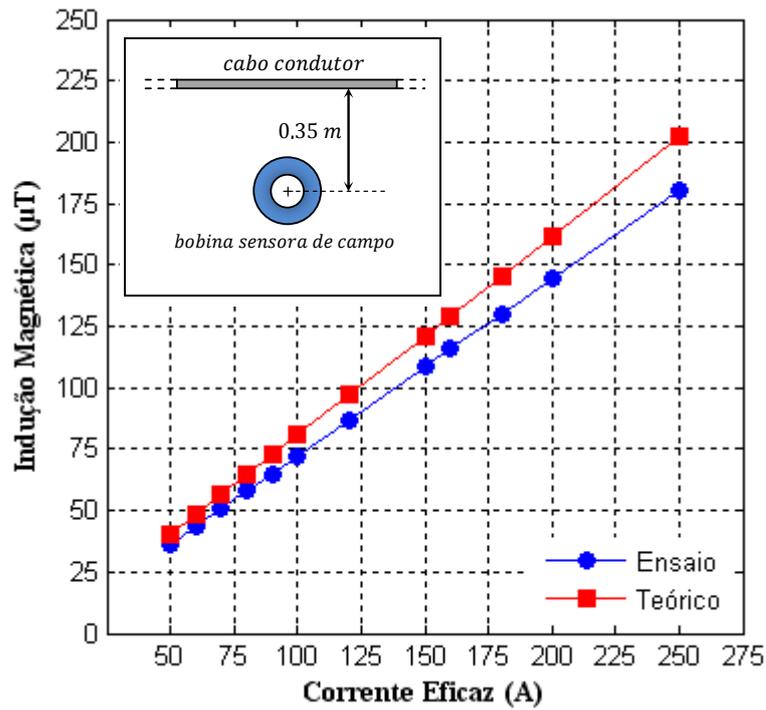


Figura 6.17 – Relação entre a máxima indução magnética no espaço livre e a corrente eficaz no cabo condutor.

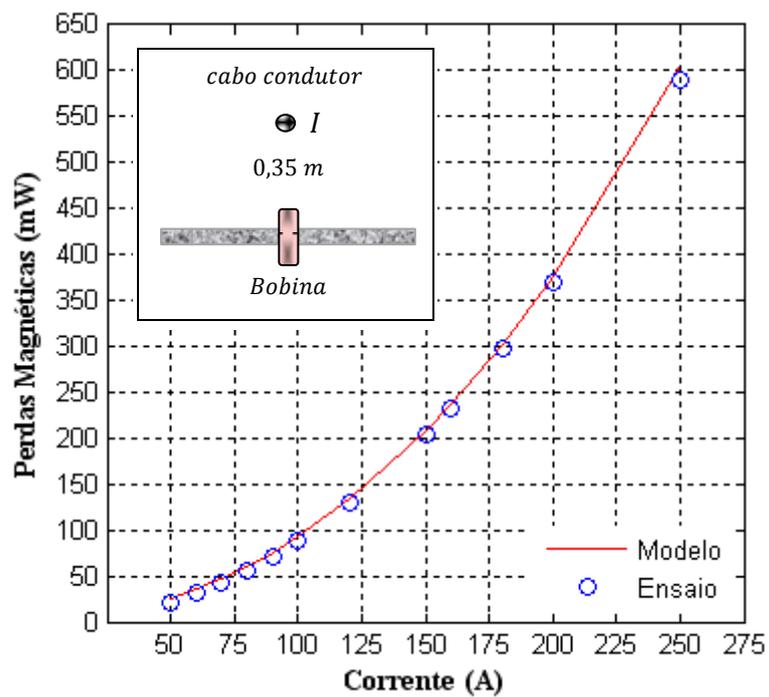


Figura 6.18 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a corrente eficaz no cabo condutor.

6.2.2.2. Ensaio 02

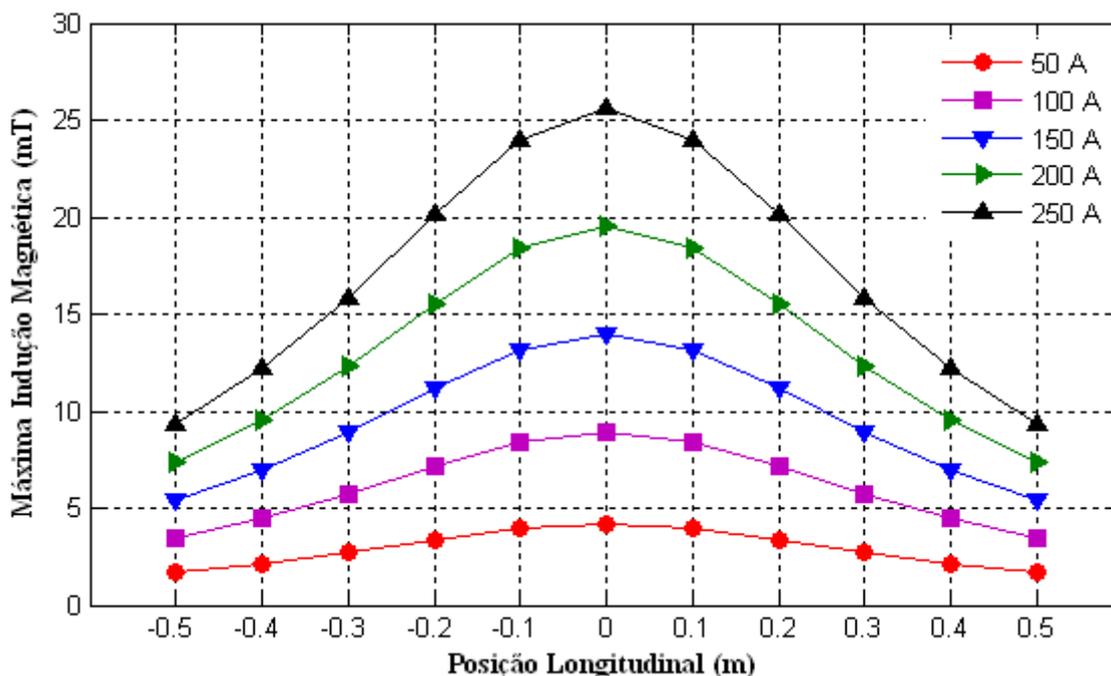


Figura 6.19 – Distribuição espacial, correspondente a 5 níveis de corrente eficaz no cabo condutor, da máxima indução magnética. Espécime sob ensaio: cantoneira 05, situada a 0,425 m do cabo e dividida em 10 incrementos com 0,1 m. Os valores da posição longitudinal tomam como origem o meio da cantoneira.

Tabela 6.2 – Comparação, entre dados experimentais e valores teóricos, das perdas magnéticas na cantoneira e da máxima indução magnética no espaço livre.

Configuração Cantoneira Solitária - Método da Bobina de Compensação				
Amostra: Cantoneira 05		Distância Relativa entre a Cantoneira e o Cabo Condutor: 0,425 m		
Variável de Controle	Perdas Magnéticas (mW)		Indução Magnética (μ T)	
Corrente Eficaz (A)	Modelo	Ensaio	Teórico	Ensaio
50,02	20,23	16,60	28,29	27,53
60,35	28,61	24,30	34,13	33,21
70,09	37,79	33,02	39,64	38,87
80,00	48,42	43,28	45,25	44,38
90,04	60,54	55,10	50,93	49,91
100,29	74,33	68,83	56,72	55,60
120,00	105,02	99,44	67,87	66,46
150,00	162,73	157,78	84,84	83,11
160,05	185,17	181,05	90,52	88,65
180,05	234,69	230,58	101,84	99,65
200,05	290,97	286,81	113,15	110,83
250,01	463,26	456,03	141,40	138,13

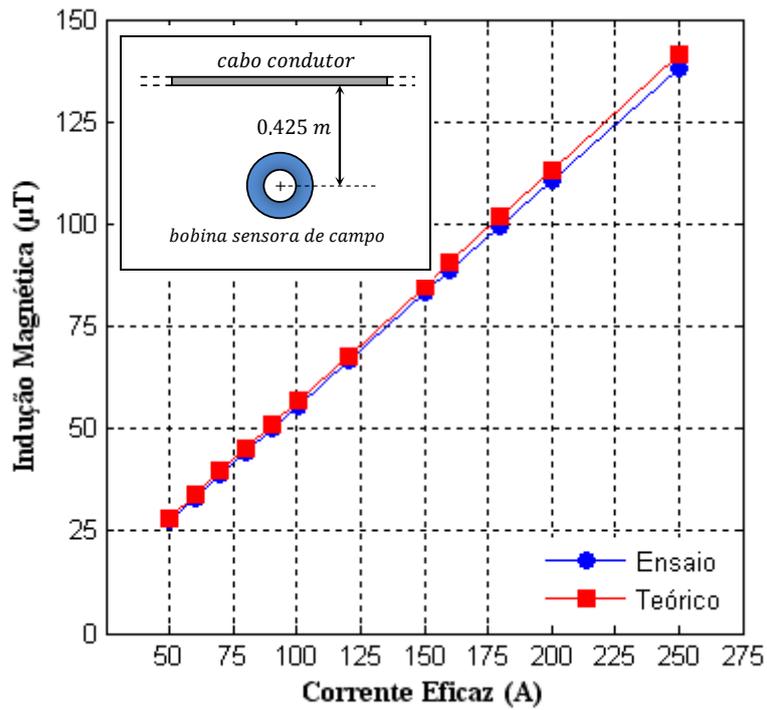


Figura 6.20 – Relação entre a máxima indução magnética no espaço livre e a corrente eficaz no cabo condutor.

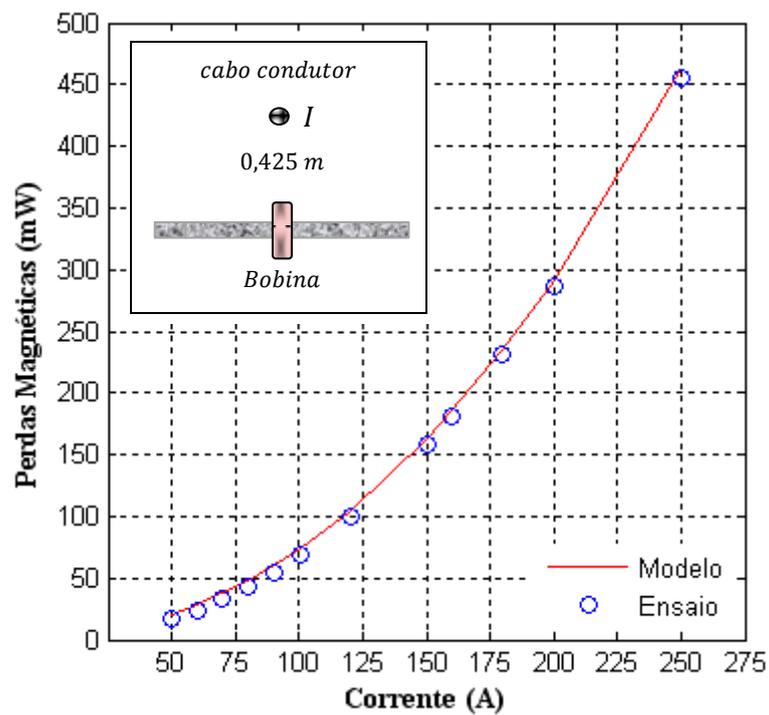


Figura 6.21 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a corrente eficaz no cabo condutor.

6.2.2.3. Ensaio 03

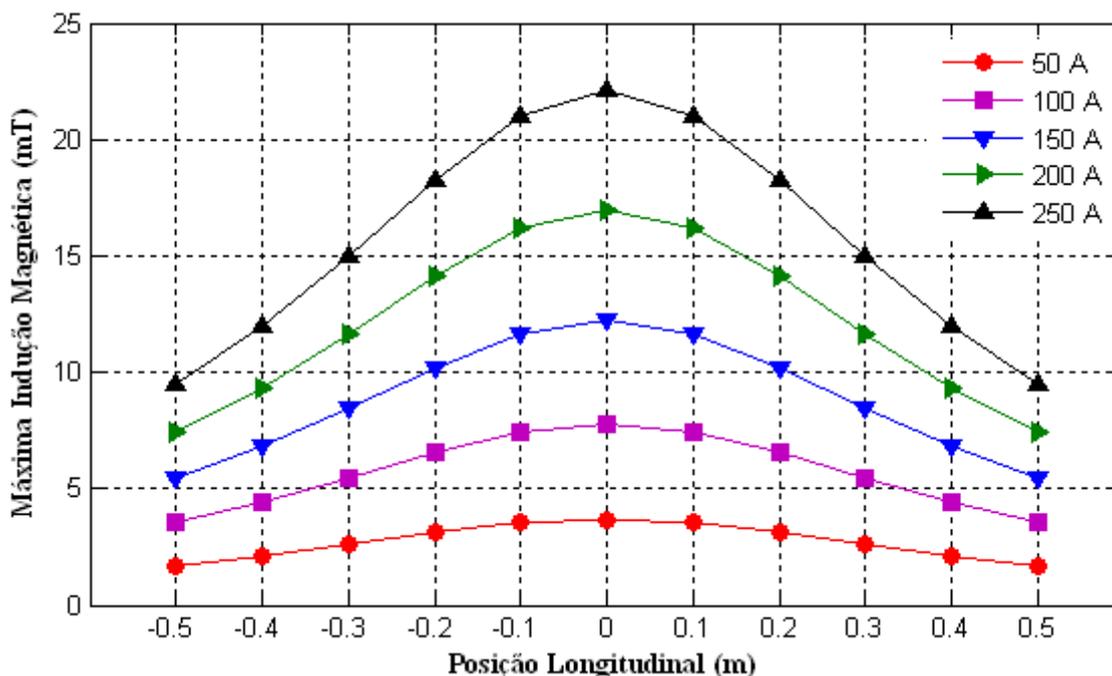


Figura 6.22 – Distribuição espacial, correspondente a 5 níveis de corrente eficaz no cabo condutor, da máxima indução magnética. Espécime sob ensaio: cantoneira 05, situada a 0,50 m do cabo e dividida em 10 incrementos com 0,1 m. Os valores da posição longitudinal tomam como origem o meio da cantoneira.

Tabela 6.3 – Comparação, entre dados experimentais e valores teóricos, das perdas magnéticas na cantoneira e da máxima indução magnética no espaço livre.

Configuração Cantoneira Solitária - Método da Bobina de Compensação				
Amostra: Cantoneira 05		Distância Relativa entre a Cantoneira e o Cabo Condutor: 0,50 m		
Variável de Controle	Perdas Magnéticas (mW)		Indução Magnética (μ T)	
Corrente Eficaz (A)	Modelo	Ensaio	Teórico	Ensaio
50,02	16,73	16,20	28,29	28,34
60,02	23,38	23,46	33,94	34,02
70,04	31,11	32,17	39,61	39,73
80,03	39,86	42,22	45,26	45,40
90,08	49,75	53,83	50,95	51,10
100,06	60,65	66,76	56,59	56,77
120,09	85,86	97,22	67,92	68,17
150,01	132,12	154,03	84,84	85,22
160,07	150,08	176,06	90,53	90,93
180,00	189,39	224,75	101,81	102,21
200,01	234,01	279,34	113,12	113,60
250,03	369,64	445,12	141,42	142,18

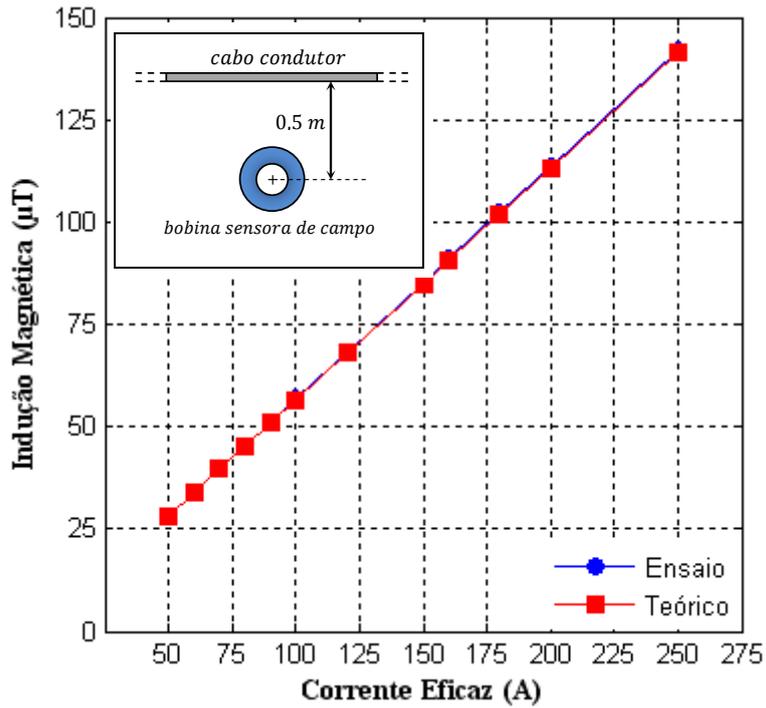


Figura 6.23 – Relação entre a máxima indução magnética no espaço livre e a corrente eficaz no cabo condutor.

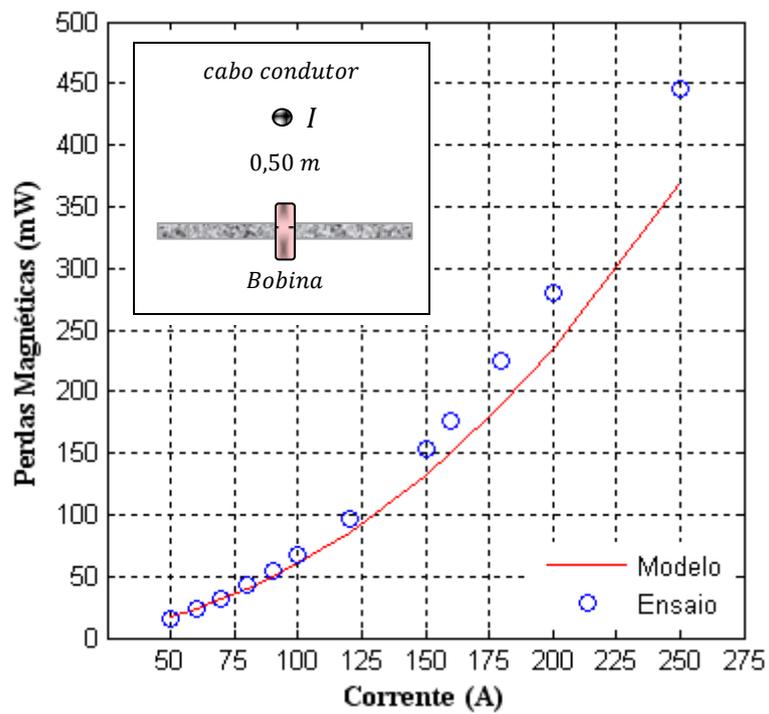


Figura 6.24 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a corrente eficaz no cabo condutor.

6.2.2.4. Ensaio 04

Tabela 6.4 – Comparação, entre dados experimentais e valores teóricos, das perdas magnéticas na cantoneira e da máxima indução magnética no espaço livre.

Configuração Cantoneira Solitária - Método do Enrolamento sobre a Amostra				
Amostra: Cantoneira 05		Distância Relativa entre a Cantoneira e o Cabo Condutor: 0,50 m		
Variável de Controle	Perdas Magnéticas (mW)		Indução Magnética (μT)	
Corrente Eficaz (A)	Modelo	Ensaio	Teórico	Ensaio
50,06	16,76	13,36	28,31	26,72
60,05	23,40	19,35	33,96	32,07
70,01	31,08	26,44	39,60	37,37
80,05	39,88	34,77	45,28	42,71
90,05	49,71	44,26	50,93	48,04
100,06	60,65	54,95	56,59	53,37
120,08	85,84	80,08	67,92	64,11
151,07	133,95	128,53	85,44	80,58
160,03	150,00	145,05	90,51	85,49
180,08	189,54	185,13	101,85	96,15
200,04	234,06	230,22	113,14	106,80
250,04	369,65	366,77	141,42	133,60

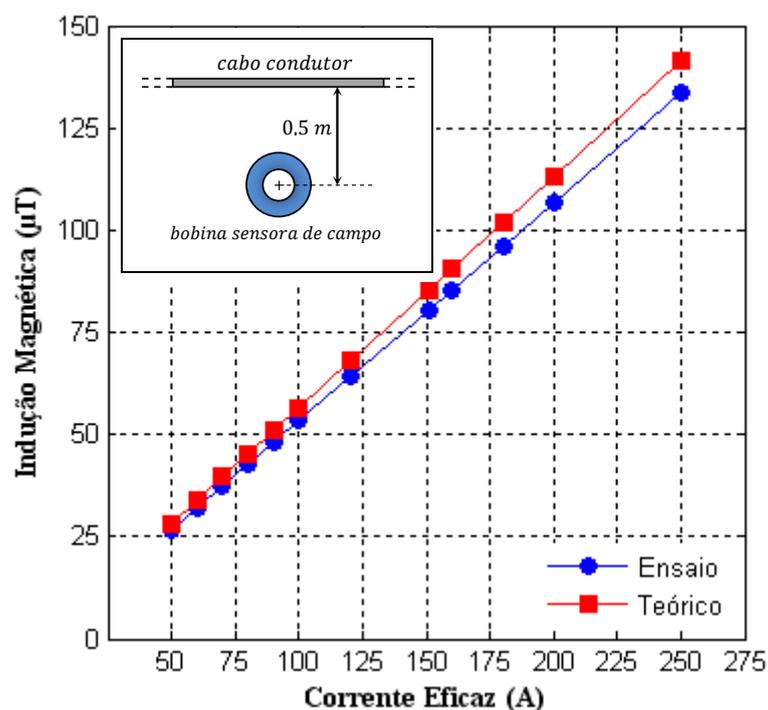


Figura 6.25 – Relação entre a máxima indução magnética no espaço livre e a corrente eficaz no cabo condutor.

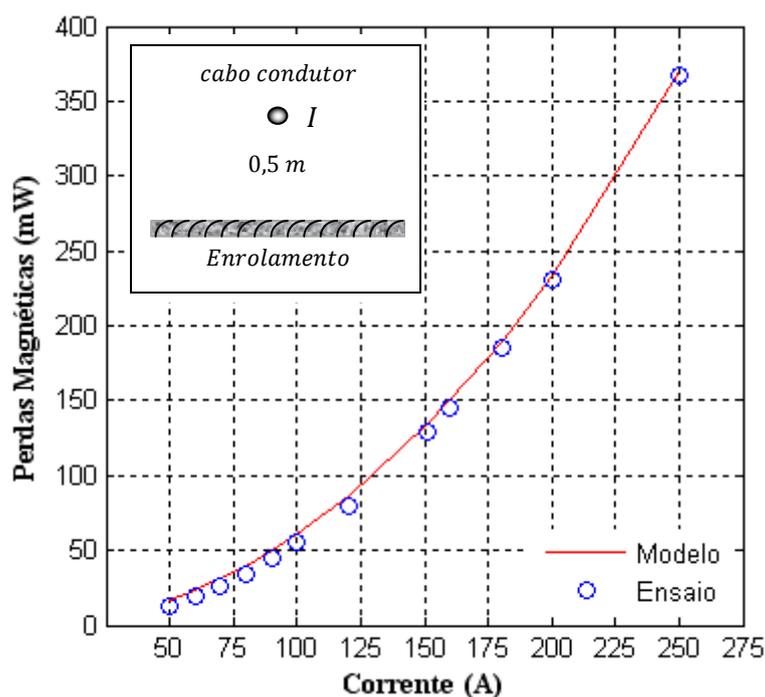


Figura 6.26 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a corrente eficaz no cabo condutor.

6.2.2.5. Ensaio 05

Tabela 6.5 – Comparação, entre dados experimentais e valores teóricos, das perdas magnéticas na cantoneira e da máxima indução magnética no espaço livre.

Configuração Janela - Método da Bobina de Compensação				
Amostras: Cantoneiras - 01, 02, 05 e 06		Distância Relativa entre a Cantoneira e o Cabo Condutor: 0,50 m		
Variável de Controle	Perdas Magnéticas (mW)		Indução Magnética (μT)	
Corrente Eficaz (A)	Modelo	Ensaio	Teórico	Ensaio
50,04	70,18	79,28	28,30	27,98
60,07	97,42	115,11	33,98	33,59
70,07	128,67	157,84	39,63	39,23
80,01	163,79	207,13	45,25	44,78
90,04	203,36	264,07	50,93	50,41
100,02	246,91	327,82	56,57	56,00
120,05	347,09	477,52	67,90	67,16
150,09	530,46	758,76	84,89	84,10
160,06	600,43	866,40	90,53	89,58
180,07	755,11	1107,20	101,85	100,86
200,04	929,12	1378,56	113,14	112,09
250,03	1456,19	2193,44	141,42	140,08

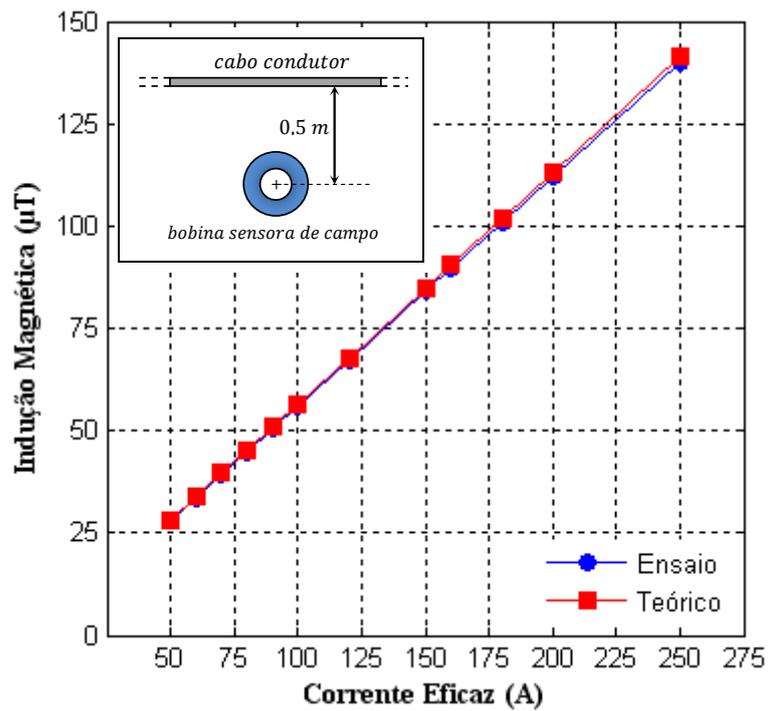


Figura 6.27 – Relação entre a máxima indução magnética no espaço livre e a corrente eficaz no cabo condutor.

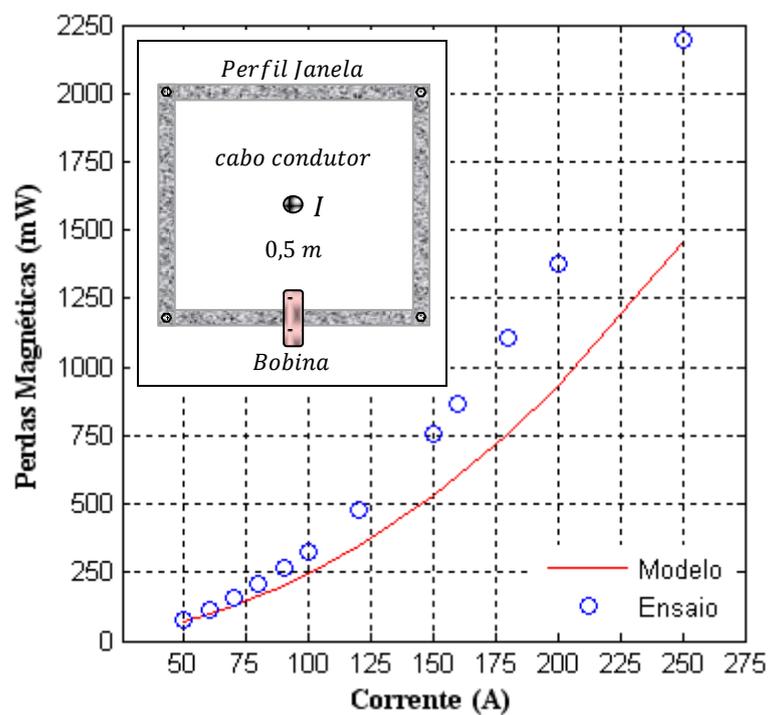


Figura 6.28 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a corrente eficaz no cabo condutor.

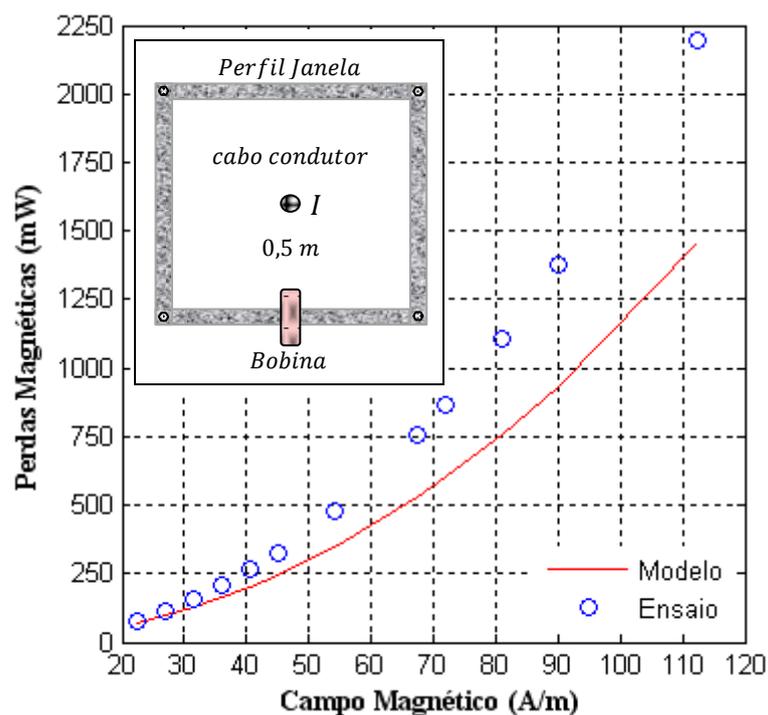


Figura 6.29 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a máxima intensidade de campo magnético no meio da cantoneira.

6.2.2.6. Ensaio 06

Tabela 6.6 – Comparação, entre dados experimentais e valores teóricos, das perdas magnéticas na cantoneira e da máxima indução magnética no espaço livre.

Configuração Janela - Método do Enrolamento sobre a Amostra				
Amostras: Cantoneiras - 01, 02, 05 e 06			Distância Relativa entre a Cantoneira e o Cabo Condutor: 0,50 m	
Variável de Controle	Perdas Magnéticas (mW)		Indução Magnética (μT)	
Corrente Eficaz (A)	Modelo	Ensaio	Teórico	Ensaio
50,01	70,18	91,28	28,29	31,23
60,04	97,43	109,10	33,96	34,08
70,01	128,60	149,53	39,60	39,78
80,00	163,91	196,73	45,25	45,46
90,03	203,52	251,03	50,92	51,14
100,05	247,29	312,10	56,59	56,83
120,00	347,17	454,72	67,87	68,17
150,00	530,40	722,44	84,84	85,32
160,04	600,91	826,32	90,52	91,04
180,06	755,83	1056,00	101,84	102,51
200,06	930,30	1314,88	113,15	113,83
250,00	1457,45	2092,44	141,40	142,15

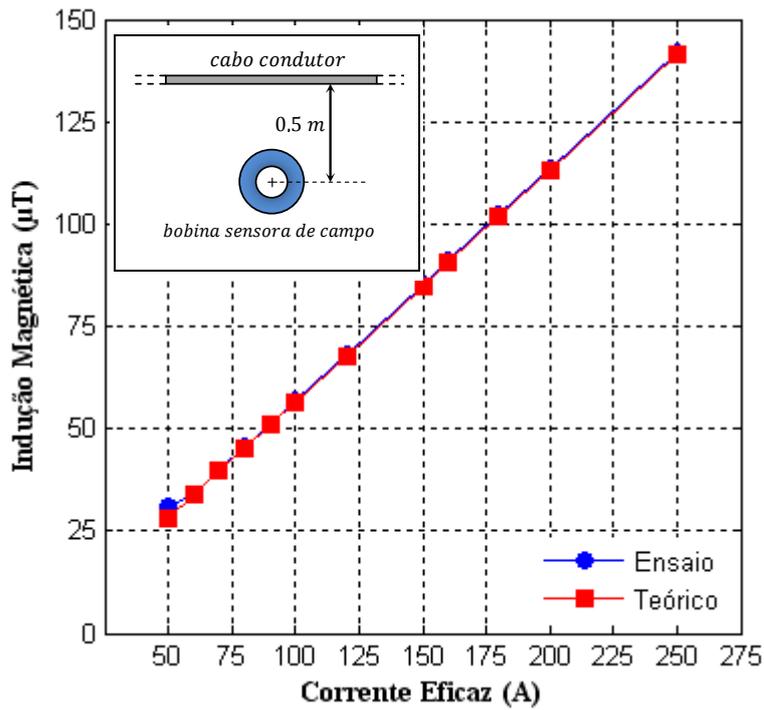


Figura 6.30 – Relação entre a máxima indução magnética no espaço livre e a corrente eficaz no cabo condutor.

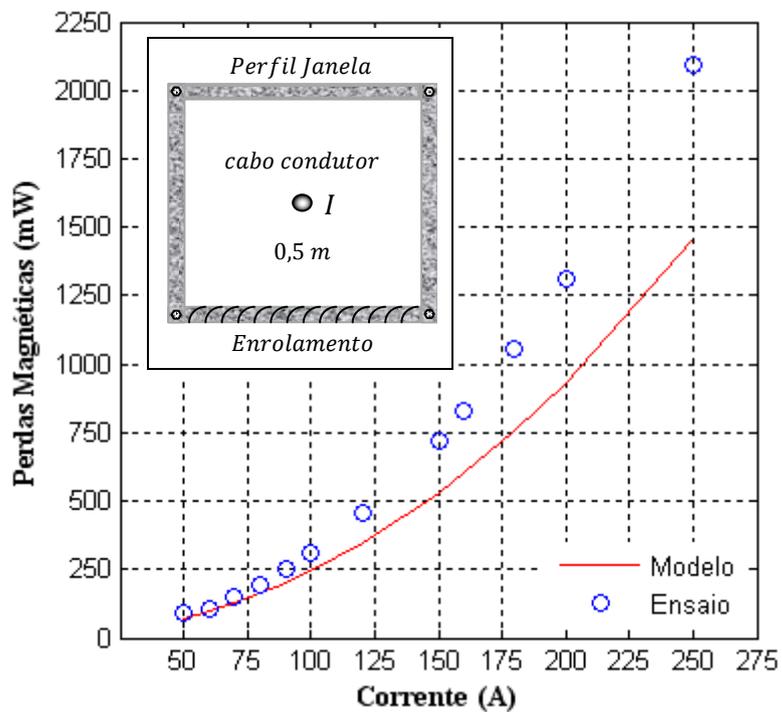


Figura 6.31 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a corrente eficaz no cabo condutor.

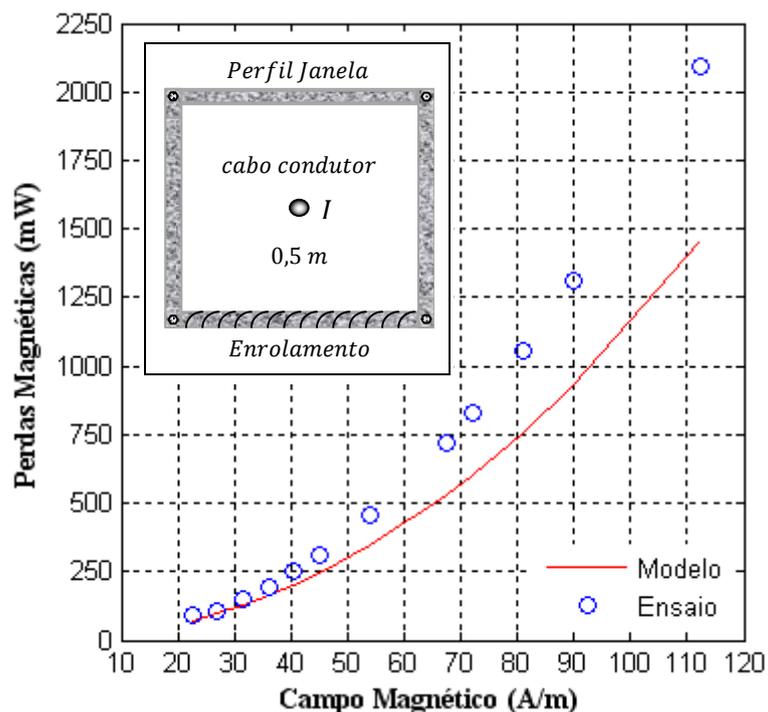


Figura 6.32 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a máxima intensidade de campo magnético a 0,5 m do cabo condutor.

6.2.2.7. Ensaio 07

Tabela 6.7 – Comparação, entre dados experimentais e valores teóricos, das perdas magnéticas na cantoneira e da máxima indução magnética no espaço livre.

Configuração Janela - Método do Enrolamento sobre a Amostra				
Amostras: Cantoneiras - 01, 02, 05 e 06			Distância Relativa entre a Cantoneira e o Cabo Condutor: 0,50 m	
Variável de Controle	Perdas Magnéticas (mW)		Indução Magnética (μT)	
Corrente Eficaz (A)	Modelo	Ensaio	Teórico	Ensaio
50,02	70,18	72,00	28,29	27,99
60,03	97,38	104,60	33,95	33,60
70,01	128,57	143,32	39,60	39,18
80,02	163,95	188,78	45,26	44,82
90,01	203,39	240,47	50,91	50,40
100,03	247,14	298,98	56,58	56,01
120,01	347,15	436,00	67,88	67,24
150,00	530,27	693,96	84,84	84,10
160,00	600,48	793,40	90,49	89,63
180,07	755,74	1016,08	101,85	101,00
200,02	929,71	1264,80	113,13	112,07
250,14	1458,76	2019,92	141,48	140,32

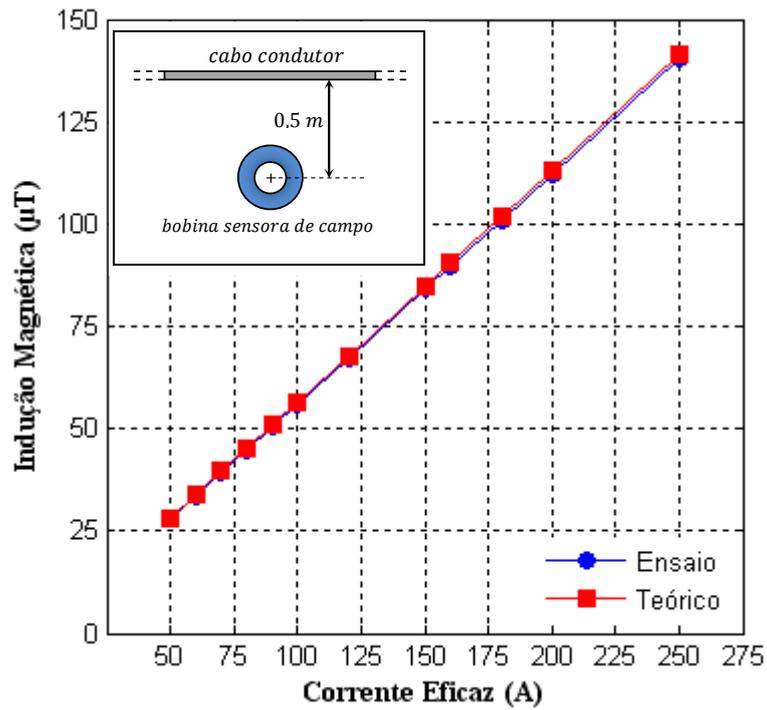


Figura 6.33 – Relação entre a máxima indução magnética no espaço livre e a corrente eficaz no cabo condutor.

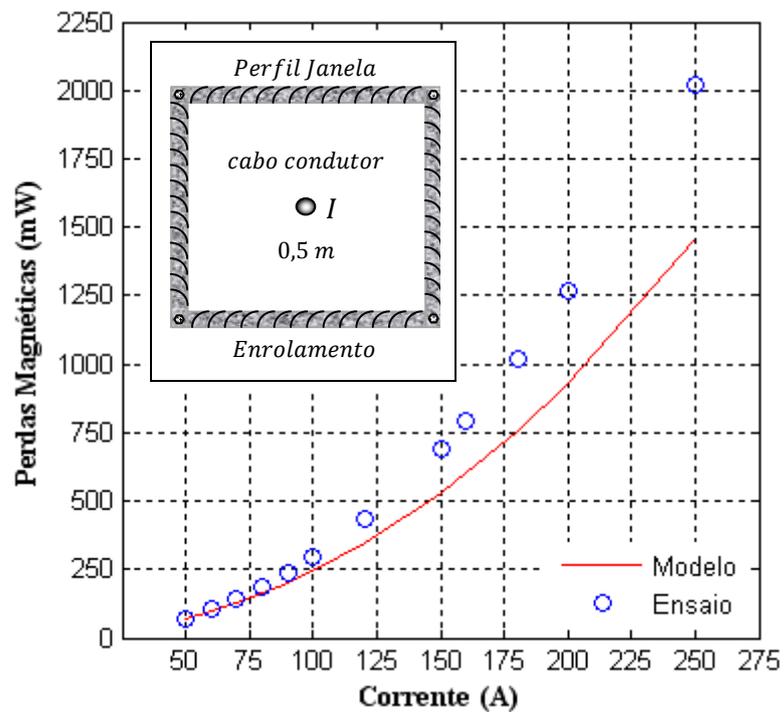


Figura 6.34 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a corrente eficaz no cabo condutor.

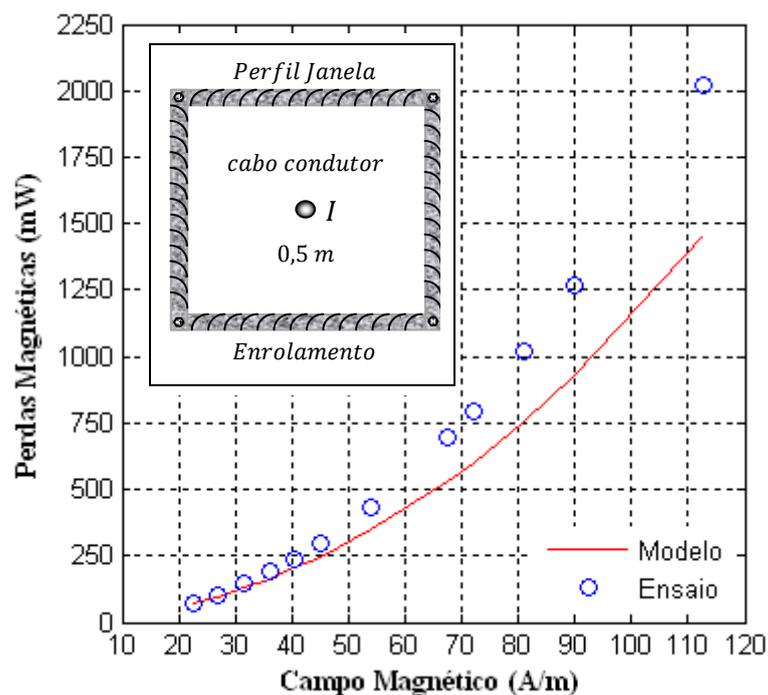


Figura 6.35 – Relação entre as perdas magnéticas na cantoneira e a máxima intensidade de campo magnético a 0,5 m do cabo condutor.

6.2.3. Análise dos resultados

Visando buscar um entendimento qualitativo dos resultados apresentados, a análise, a ser apresentada, tem como objetivo esclarecer a validade da metodologia de cálculo proposta, baseada em condições de domínio preestabelecidas neste trabalho, e descrever o comportamento do fenômeno estudado, perdas magnéticas, sob o ponto de vista experimental.

Recordando o domínio estabelecido para a curva B_m - H_m do material, foi visto que intensidades de campo magnético na gama $42,87 \text{ A/m} \leq H \leq 428,72 \text{ A/m}$ são satisfatórias à resposta magnética, B , do material que compõe as amostras das cantoneiras. Observando as curvas relacionadas à máxima indução magnética no espaço livre, verifica-se que o comportamento desta grandeza é proporcional à proximidade do cabo condutor e à corrente que circula no mesmo. De forma conservadora, restringindo esta análise à curva apresentada pela figura 6.17, onde se encontra o maior registro da grandeza mencionada, verifica-se que o maior valor teórico obtido para a máxima indução magnética é de $202,02 \mu\text{T}$. Como a indução magnética se relaciona com a intensidade de campo, que por sua vez independe do meio, pela relação apresentada em 2.27, conclui-se que a intensidade de campo correspondente a esta indução, $202,02 \mu\text{T}$, é de $160,76 \text{ A/m}$. Por se tratar de uma análise conservadora, é

convincente dizer que em todos os ensaios realizados as amostras foram submetidas à intensidades de campo magnético inferiores a aqui registrada. Como consequência, a aplicação da curva B_m-H_m obtida pelo ajuste, como apresentada pela equação (5.16), se fez eficaz para o cálculo das máximas induções nas cantoneiras, apresentadas graficamente nas figuras 6.16, 6.19 e 6.22.

Outro ponto que merece destaque, no que diz respeito à utilização de valores teóricos de intensidade de campo no cálculo das máximas induções no material, foram os resultados apresentados na medição dos valores de pico da indução magnética no espaço livre. Comparando os dados experimentais com os valores teóricos, nota-se, que estes satisfazem, com eficácia, a descrição real do comportamento do campo magnético nas proximidades do cabo condutor. Apesar das medições se concentrarem abaixo e na direção do cabo, há indícios da aplicação de valores teóricos de intensidade de campo, ao longo do eixo longitudinal das cantoneiras, terem sido de boa precisão.

Após a validação do uso da curva de histerese e da justificativa para o uso plausível de dados teóricos de máxima intensidade de campo magnético no material, o objetivo se concentrou no domínio preestabelecido no modelo de caracterização das perdas magnéticas nas amostras, conforme apresentado no capítulo 4. Como visto no mesmo, mais precisamente no item 4.5, fez-se uma ressalva, que caberia investigar se a aplicação do modelo estaria sujeita a regimes de indução acima de 200 mT. Predisposto a fazer esta investigação para a aplicação do modelo ao método de cálculo proposto, foram traçadas as curvas de distribuição espacial da máxima indução magnética ao longo do perfil longitudinal das cantoneiras, como mostrado pela figuras 6.16, 6.19 e 6.22. Novamente tomando uma análise conservadora, observa-se, como apresentado pela figura 6.16, que a máxima indução magnética registrada na amostra é em torno de 32,5 mT. De fato, conforme ilustrado pela figura 4.9, esse valor está muito abaixo do limite máximo, 200 mT, onde o modelo começa a divergir dos valores experimentais. Cabe ainda ressaltar que, naqueles ensaios realizados, as amostras sequer foram submetidas a regimes de máxima indução inferiores a 75 mT. No entanto, de acordo com a tendência das curvas de desvio registradas pela figura 4.10, pode-se concluir que a aplicação das curvas que caracterizam as perdas magnéticas nas amostras à metodologia de cálculo proposta, gera erros insignificantes no que diz respeito aos limites de indução magnética na amostra.

Sobre os resultados obtidos através dos ensaios realizados, o comportamento das perdas magnéticas nas amostras se mostraram como esperado, ou seja, crescem exponencialmente com o aumento da indução magnética. Com relação à aplicação do método para descrever o fenômeno, o modelo se mostrou persuasivo para a configuração cantoneira solitária.

Para a configuração janela, os resultados obtidos foram insuficientes para acompanhar as medidas realizadas. Uma hipótese, que talvez seja plausível para explicar a divergência dos resultados, pode estar relacionada ao acoplamento magnético que existe entre as cantoneiras quando colocadas próximas umas às outras. No entanto, a maneira como as perdas são calculadas parece ser eficiente. A análise deve se concentrar como a indução magnética no material é calculada. De fato, o cálculo realizado para determinar a máxima indução magnética não contempla as não linearidades do fenômeno como, por exemplo, condições de fronteira, efeitos de borda, etc.

Uma análise mais acurada sobre a eficiência do método deve ser feita quando utilizar-se de um modelo que considere um cálculo mais eficiente da indução magnética nas amostras, dando atenção às não linearidades existentes, como por exemplo, “efeitos de borda”.

CAPÍTULO 7

Cálculo de Perdas Magnéticas em Torres de Transmissão de Energia Elétrica

Este capítulo, dedicado ao principal objetivo deste trabalho, contempla a aplicação da metodologia desenvolvida em dois tipos de torres de transmissão, autoportante e estaiada.

Uma vez dispostas às mesmas regiões de campo magnético, as perdas magnéticas nestas torres dependem, exclusivamente, apenas de suas geometrias estruturais, contando, é claro, que sejam construídas com materiais de mesmas características eletromagnéticas.

Sob o ponto de vista estrutural, as torres do tipo autoportante se apresentam mais robustas, com maior volume de material, perante as torres do tipo estaiada. A princípio, devido a estas características, espera-se que as perdas magnéticas em torres do tipo autoportante sejam maiores do que nas torres do tipo estaiada. Contudo, uma análise da disposição de campo magnético nestas estruturas se faz necessária.

Como já apresentada, a metodologia proposta para o cálculo das perdas magnéticas requer, entre outros dados, a distribuição de campo magnético ao longo de toda a extensão do material. Em uma torre de transmissão de energia, devido à complexidade da disposição do conjunto de cantoneiras que constitui sua estrutura, o cálculo tridimensional do campo magnético em seus perfis metálicos requer uma ferramenta computacional dotada de uma metodologia robusta de cálculo. Na busca por uma simulação que se aproximasse de uma situação real, este trabalho adotou como ferramenta computacional o programa FDETP (*Frequency Domain Electromagnetic Transients Program*) [24,25,26], que permitiu a modelagem tridimensional das torres e o cálculo da intensidade de campo magnético na estrutura das mesmas.

A análise, a ser apresentada no término deste capítulo, terá como enfoque principal uma discussão sobre o grau de importância que as perdas magnéticas nas estruturas têm no cenário de perdas de potência no sistema de transmissão. Neste contexto, como parâmetro de comparação, serão apresentados valores referentes às perdas Joule [27] e corona [28] nos cabos condutores da configuração a ser considerada nas simulações.

7.1. Aspectos básicos

Uma vez determinada as características elétricas e magnéticas – constantes de perdas magnéticas e a curva que relaciona B_m e H_m – do material que compõe a estrutura de uma torre de transmissão, o passo inicial para o projeto que visa estabelecer as perdas magnéticas em uma torre de transmissão, é fazer o levantamento de dados que influenciam no cálculo tridimensional do campo magnético na região que contém a estrutura (a saber: disposição e tipo dos condutores; grau de equilíbrio do sistema trifásico; carregamento da LT; topografia e resistividade do terreno; condições climáticas; comprimento do vão, etc) e, além disso, determinar toda a distribuição espacial de todos os componentes da estrutura: cantoneiras, estais e cabos estruturais. Deve-se ainda, atentar que as condições climáticas podem alterar a condutividade elétrica do material que compõe as estruturas da torre e, conseqüentemente, estabelecer novos valores para a constante parasítica no modelo de perdas do material, afinal esta depende da condutividade.

De fato, existe uma gama razoável de parâmetros que devem ser analisados. No entanto, em se tratando de engenharia, muitas considerações simplificadoras podem ser feitas, o que não implica em um erro grosseiro para os cálculos.

Neste projeto, de antemão, fez-se duas suposições:

- i. que a estrutura das torres estudadas fosse integrada pelo mesmo tipo de material que compõe o conjunto de cantoneiras, cujas grandezas necessárias ao modelo de perdas já foram determinadas;
- ii. material submetido a um campo magnético gerado por um sistema suposto trifásico, senoidal, balanceado e com frequência de 60 Hz.

A modelagem tridimensional da estrutura autoportante, cujas grandezas dimensionais foram necessárias, se baseou em um projeto real de torre, ao passo que a modelagem da torre tipo estaiada foi feita de forma estilizada.

A configuração eletro-estrutural da torre autoportante, utilizada para se estimar as perdas magnéticas, se baseou nas torres que compõem o sistema de transmissão de 525 kV que interliga a usina de Itaipu a SE de Foz do Iguaçu, conforme apresentadas na figura 7.1. Este sistema, composto por 4 linhas de transmissão, possui em média 8 km de extensão, totalizando 79 torres.



Torre autoportante

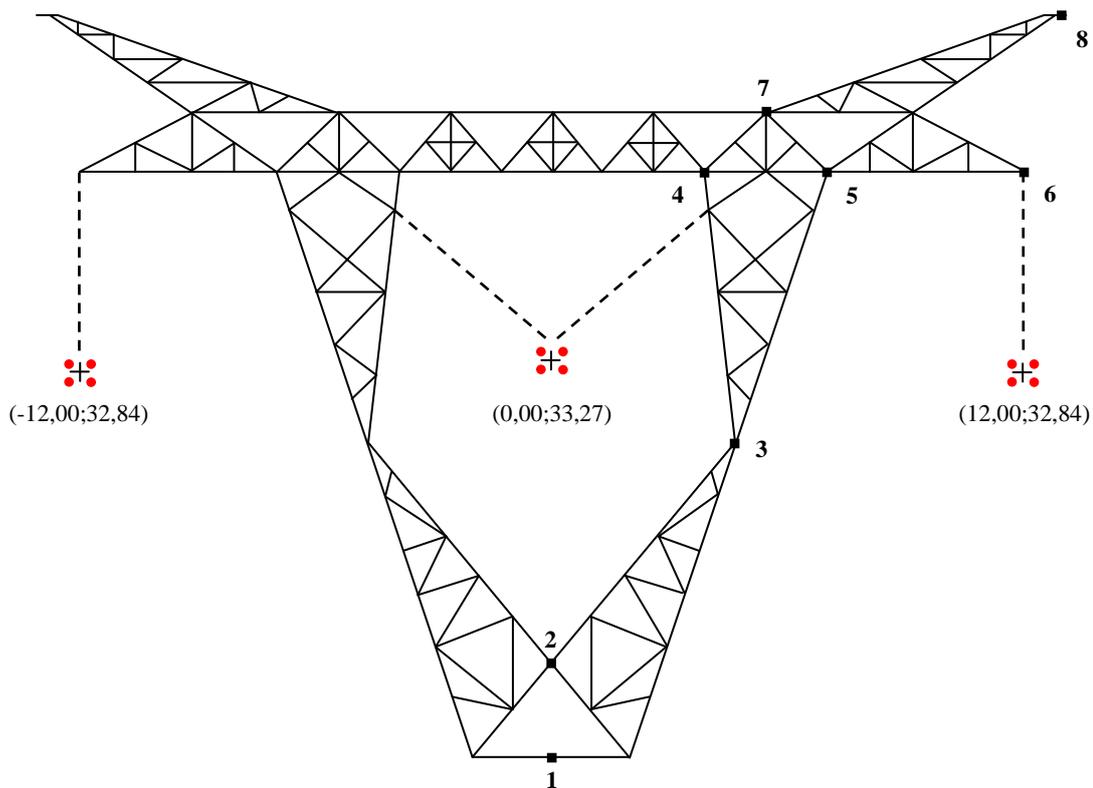


Configuração do feixe de fase

Figura 7.1 – Vão do sistema de transmissão que interliga a usina de Itaipu a SE de Foz do Iguaçu [29].

Algumas características de projeto dessas linhas, que também serviram como dados para o cálculo tridimensional do campo magnético, são identificadas a seguir:

- Tensão nominal entre fases: 525 kV;
- Circuito simples, disposição horizontal das fases;
- Número de sub-condutores por fase: 4;
- Tipo de cabo condutor: CAA 954MCM – RAIL;
- Dimensões do feixe: quadrado com 457 mm de lado;
- Vão típico: 400 m;
- Tipo de cabo para raios: CAA 266,8 MCM PARTRIDGE;
- Corrente nominal de projeto: 1980 A;
- Corrente máxima admissível por fase: 2595 A;
- Temperatura máxima nominal do condutor: 60 °C;
- Altura mínima condutor-solo: 12,5 m;



Coordenadas (m)	
1 - (0,00;23,00)	5 - (07,00;38,00)
2 - (0,00;25,40)	6 - (12,00;38,00)
3 - (4,67;31,00)	7 - (05,44;39,50)
4 - (3,87;23,00)	8 - (12,78;42,00)

Figura 7.2 – Vista da porção frontal da “cabeça da torre”. Na legenda são apresentadas as coordenadas dos pontos demarcados pelos algarismos decimais. A origem é ponto de simetria na base da torre. A posição central dos feixes, no plano de simetria da estrutura perpendicular à diretriz da linha, é assinalada com + e tem a marcação de suas coordenadas. As cadeias de isoladores, em IVI, são representadas pela linha tracejada, ----.

A modelagem tridimensional da torre estaiada, feita de forma estilizada, se baseou no dimensionamento típico de uma torre real com nível de tensão de 500 kV. A configuração e a disposição dos feixes, utilizados como um dos parâmetros para se determinar a distribuição de campo magnético nos perfis de aço, foi a mesma descrita para a estrutura autoportante.

7.2. Simulação computacional

A base da simulação computacional foi realizada por intermédio do programa FDETP, elaborado no departamento de Linhas e Estações da Eletrobrás Cepel. A metodologia empregada no programa FDETP é fundamentada no domínio da frequência e permite analisar “circuitos elétricos”, bidimensionais e tridimensionais, constituídos por vários elementos lineares e não-lineares.

A simulação, com o objetivo de determinar a distribuição espacial do campo magnético nos perfis de aço das estruturas, se deu em duas etapas: na modelagem tridimensional das torres e dos elementos necessários ao cálculo tridimensional do campo magnético.

7.2.1. Modelagem das torres

Em uma estrutura real de uma linha de transmissão, além do eventual uso de estais e cabos de aço, há uma gama razoável de tipos de treliças, em função da variação das dimensões transversais e longitudinais de cada treliça, além de uma substancial quantidade total de treliças, o que dificulta obter resultados precisos por vários dos programas computacionais existentes no Setor para o cálculo de campos eletromagnéticos tridimensionais. Não obstante, o programa FDETP possui, em seu banco de modelos, elementos cilíndricos tridimensionais que permitem, com resultados satisfatórios, a representação de torres de transmissão [24,25].

Neste projeto, os perfis estruturais foram representados por um grupo de centenas de treliças, conforme padrão existente no programa FDETP, sendo cada treliça simulada por eletrodos cilíndricos tridimensionais de aço, com o raio de 5 cm. Para cada estrutura, foram feitas 3 modelagens, de acordo com o nível de discretização da quantidade de treliças. As figuras 7.3 e 7.4 apresentam a vista frontal dos modelos obtidos para 3 níveis de discretização. Quanto maior o nível de discretização, melhor é a representação do modelo, de forma a se aproximar de uma estrutura real. No nível 0, a torre é representada apenas pelos seus membros principais. Nos níveis 1 e 2, a torre é representada por treliças intermediárias, porém com ordens de divisão distintas.

Para a modelagem tridimensional da torre estaiada, os estais, que fixam os mastros ao solo, também foram considerados.

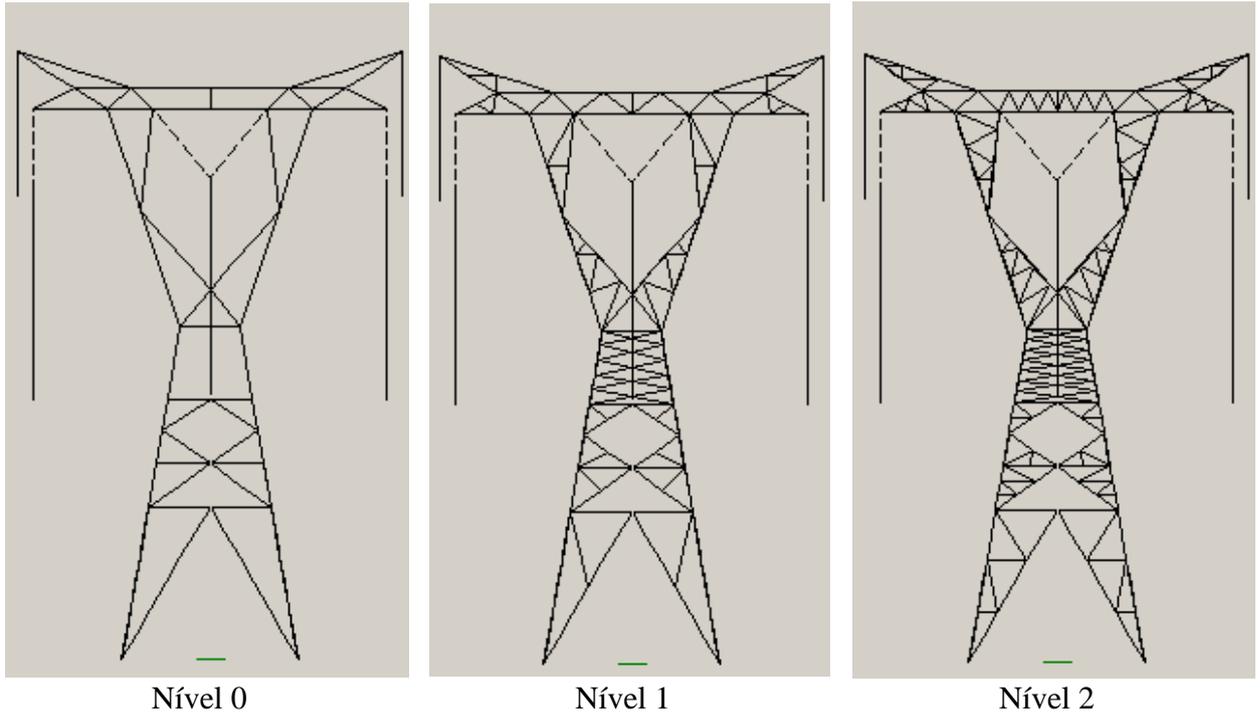


Figura 7.3 – Níveis de discretização para o modelo tridimensional da torre autoportante.

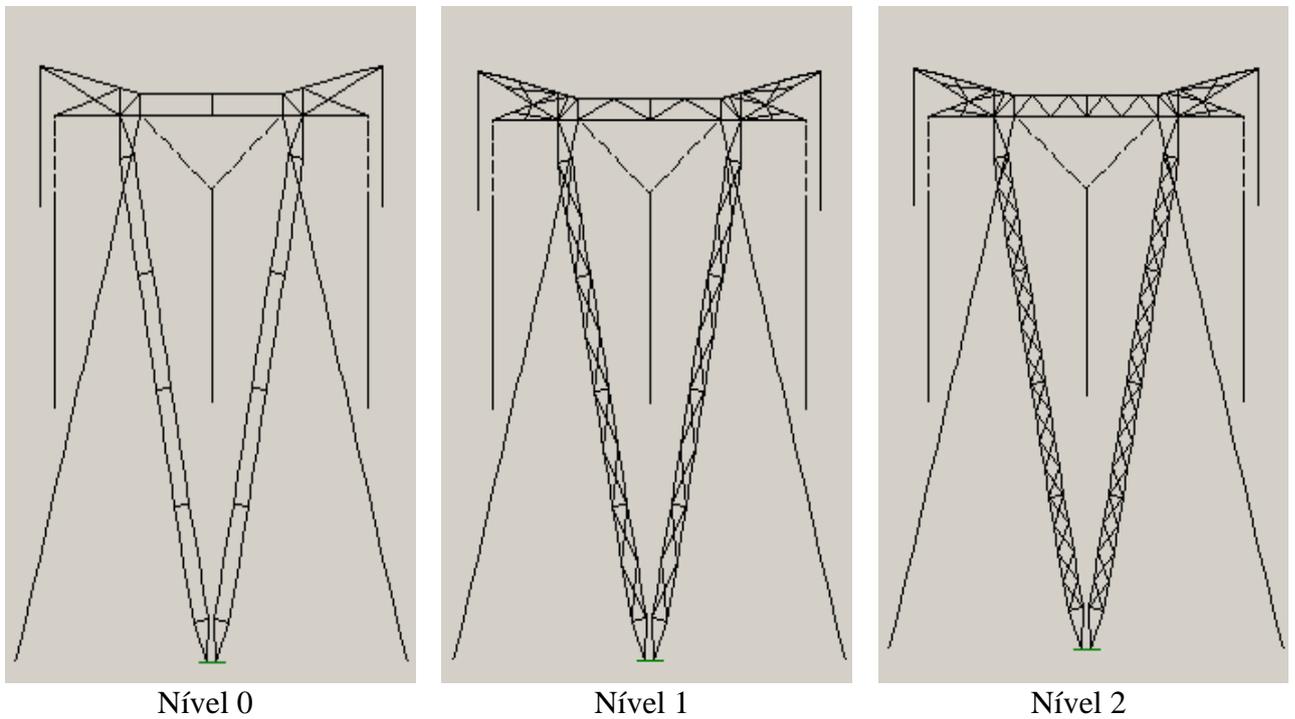


Figura 7.4 – Níveis de discretização para o modelo tridimensional da torre estaiada.

7.2.2. Cálculo tridimensional do campo magnético nos perfis de aço estrutural

Para o cálculo tridimensional do campo magnético, foi considerado um trecho da linha composto por uma estrutura metálica e os cabos dos dois vãos adjacentes, com 400 m cada.

Buscando-se precisão satisfatória para o cálculo dentro de esforço computacional moderado, fez-se uma modelagem híbrida do trecho da linha, combinando elementos do tipo “campo eletromagnético tridimensional” com elementos do tipo “circuito elétrico”, isto é:

- *Fontes de corrente*

Para a análise em regime permanente, numa extremidade da linha, conectou-se, às três fases, uma fonte de corrente senoidal e equilibrada, com amplitudes de 1 A. Na outra extremidade da linha, procedeu-se o casamento das impedâncias, de forma a minimizar possíveis efeitos indesejáveis de reflexão.

- *Sistema de aterramento da estrutura*

Representado por uma impedância equivalente com o valor de 25 Ω .

- *Cabos*

Para a presente análise em regime permanente de operação da linha, como a aplicação das fontes de corrente não se dá diretamente na estrutura, mas sim nos cabos da linha, foi importante considerar adequadamente o acoplamento eletromagnético entre os cabos e a estrutura. Sendo assim, considerou-se também uma modelagem tridimensional dos cabos da linha por eletrodos cilíndricos, adequadamente subdivididos, e com as características elétricas e físicas descritas no projeto de linha para a torre autoportante.

- *Solo*

O solo foi considerado plano e homogêneo em toda a extensão do trecho considerado. Adotaram-se a sua resistividade sendo igual a 500 Ω .m e a sua permissividade sendo 10 ϵ_0 .

As figuras 7.5 e 7.6 apresentam uma vista isométrica da modelagem tridimensional feita para a torre e os vãos. Para o modelo da torre estaiada, foram considerados também os estais.

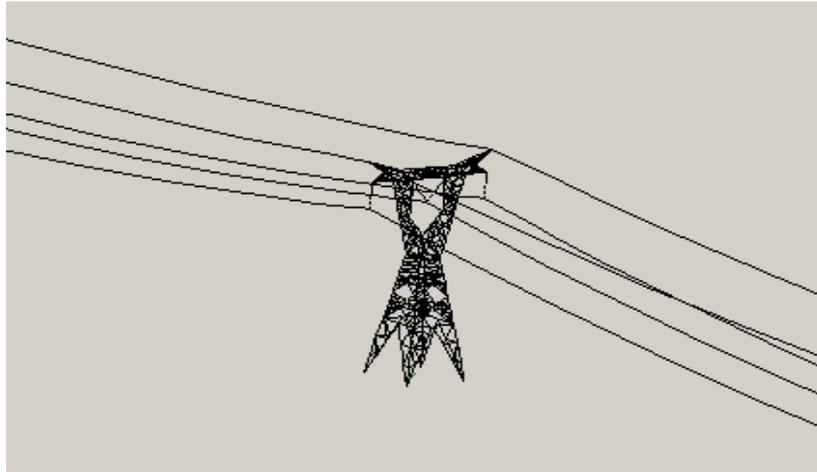


Figura 7.5 – Modelagem tridimensional do trecho para o cálculo tridimensional do campo magnético na estrutura autoportante.

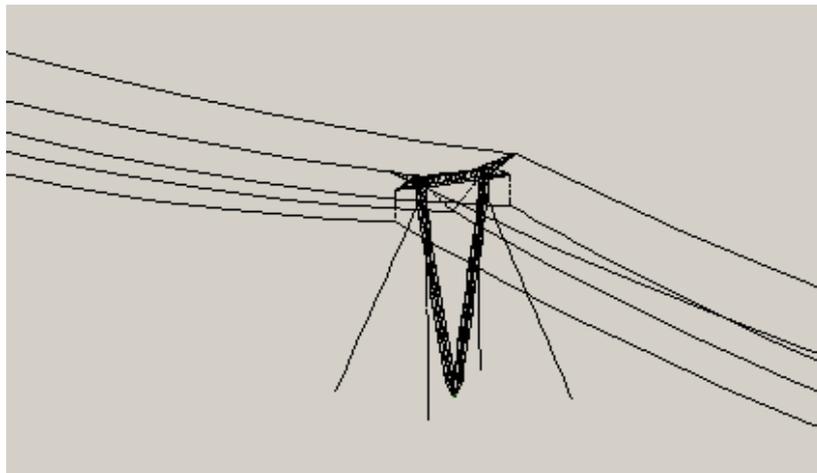


Figura 7.6 – Modelagem tridimensional do trecho para o cálculo tridimensional do campo magnético na estrutura estaiada.

7.3. Cálculo das perdas magnéticas nas estruturas

Após a modelagem dos elementos, a conduta tomada foi a execução computacional dos casos e a extração dos dados pertinentes ao cálculo das perdas magnéticas nas estruturas, isto é, dos pontos espaciais das extremidades de cada eletrodo e do valor da componente longitudinal de campo magnético para cada eletrodo. De posse destes dados, foi aplicada a metodologia proposta, a partir de sua etapa (v), para o cálculo das perdas magnéticas.

Os valores referentes aos parâmetros característicos do modelo de perdas, K_h , α , K_f' e β , aplicados na etapa (vi) do método, foram os determinados para o conjunto de cantoneiras, conforme apresentado pela equação 4.5.

Para a realização dos cálculos das perdas, foram criadas rotinas computacionais visando estabelecer o comportamento das perdas nas estruturas de acordo com o carregamento da linha.

Como não há uma padronização, sob o ponto de vista eletromagnético, do tipo de aço estrutural que compõe as torres de transmissão, tanto as constantes histeréticas e parasíticas, como também a permeabilidade relativa do material, podem variar para cada estrutura. De fato, a permeabilidade relativa do material é um parâmetro que possui influência considerável sobre as perdas magnéticas, visto que quanto maior a indução magnética no material, maior serão as suas perdas. Sendo assim, como meio de prevê-las em função deste parâmetro, foram criadas, também, rotinas computacionais que permitiram investigar o comportamento do fenômeno estudado em função da permeabilidade relativa. Cabe ressaltar que o conceito de permeabilidade relativa, aqui utilizado, trata-se da razão entre B_m e H_m .

7.4. Apresentação dos resultados

A apresentação dos resultados foi dividida em 3 blocos. Nos blocos 1 e 2 serão apresentados os resultados referentes às estruturas autoportante e estaiada, respectivamente. De acordo com os níveis de discretização para o modelo das torres, as perdas magnéticas foram calculadas em função do nível de carregamento da linha e da permeabilidade relativa do material que compõe as estruturas. Para o nível de carregamento, os resultados foram obtidos na gama $0 \leq I_{eficaz,linha} \leq 3$ kA.

Na verificação do comportamento das perdas magnéticas em função da permeabilidade relativa, foi feita a consideração que o valor desta grandeza fosse constante em toda a estrutura, independente da intensidade de campo magnético no material. Obviamente, na prática, isso é inconsistente, pois os tipos de aço estrutural que compõem as estruturas são materiais ferromagnéticos. No entanto, por se tratar de um estudo investigativo sob esse aspecto, os valores de permeabilidade utilizados nas simulações podem ser considerados como valores médios. A gama deste parâmetro, escolhida para determinar as perdas magnéticas, foi de $0 \leq \mu_{relativa} \leq 5000$, e o valor eficaz da corrente nas fases da linha sendo igual ao valor nominal estabelecido no projeto das linhas sustentadas pelas torres autoportantes, ou seja, 1980 A.

Ainda, para cada um destes blocos apresentados, são mostrados resultados comparativos entre os 3 níveis de discretização utilizados para a modelação das torres.

Com o intuito de investigar qual o tipo de estrutura mais contribui para as perdas magnéticas, no bloco 3 são apresentados resultados para o nível 1 de discretização que comparam as perdas, tanto em função do carregamento como em função da permeabilidade relativa, entre as duas estruturas.

7.4.1. Torre autoportante

7.4.1.1. Nível 0

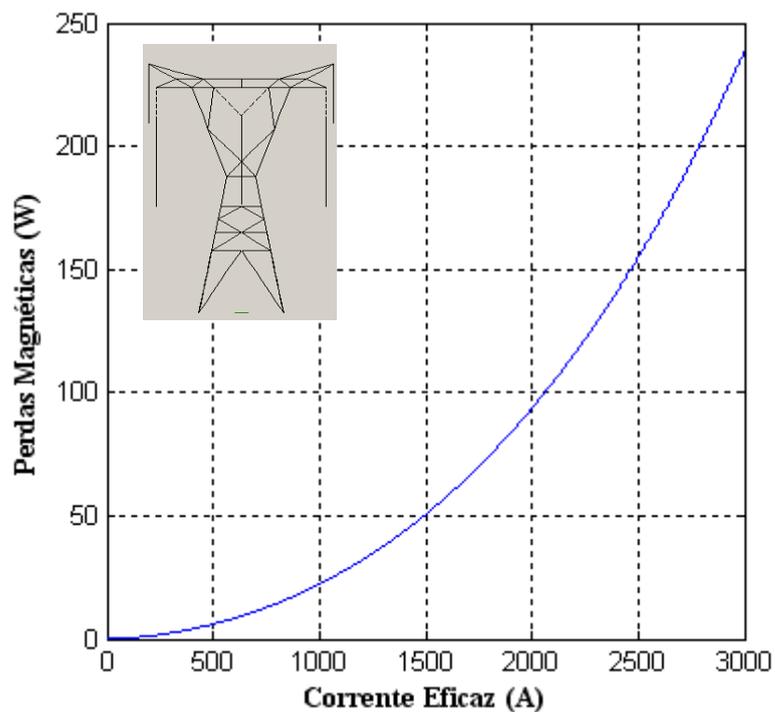


Figura 7.7 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

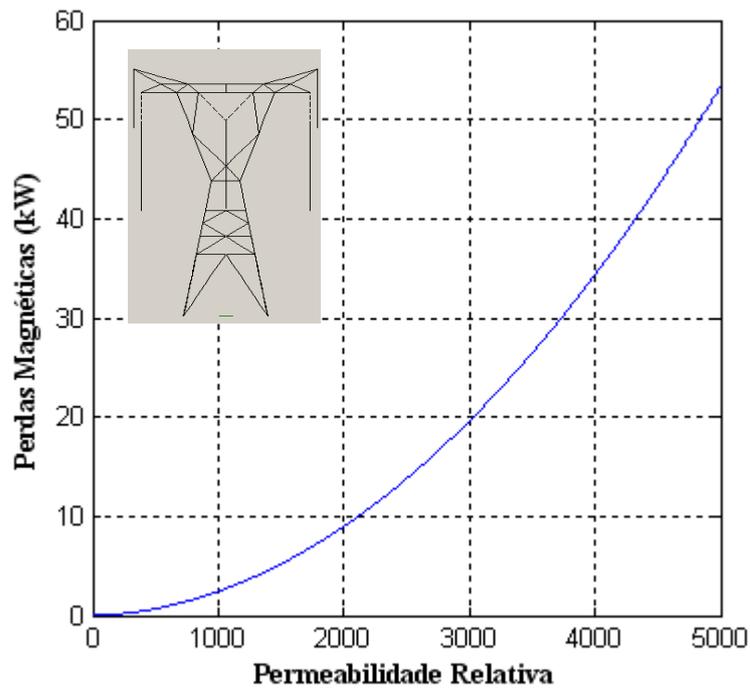


Figura 7.8 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

7.4.1.2. Nível 1

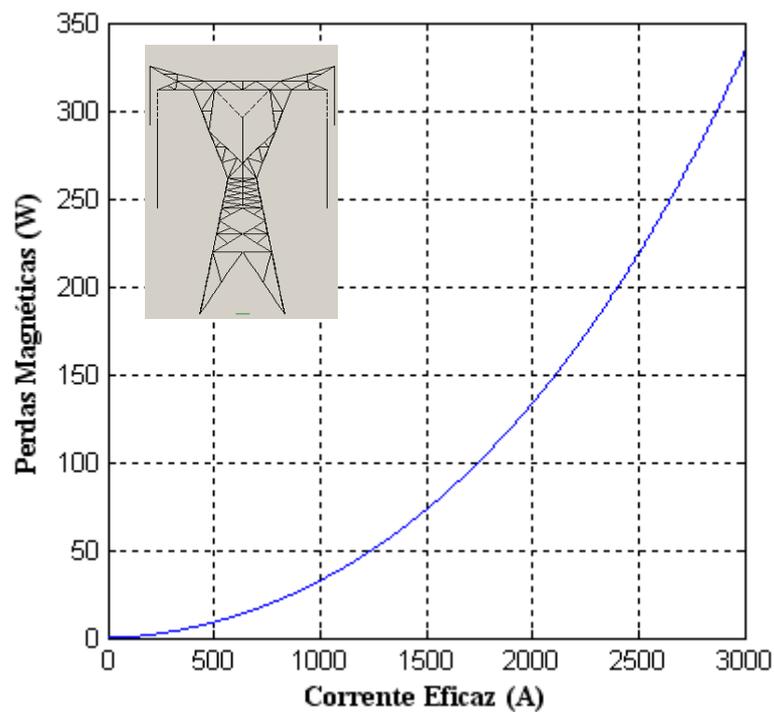


Figura 7.9 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

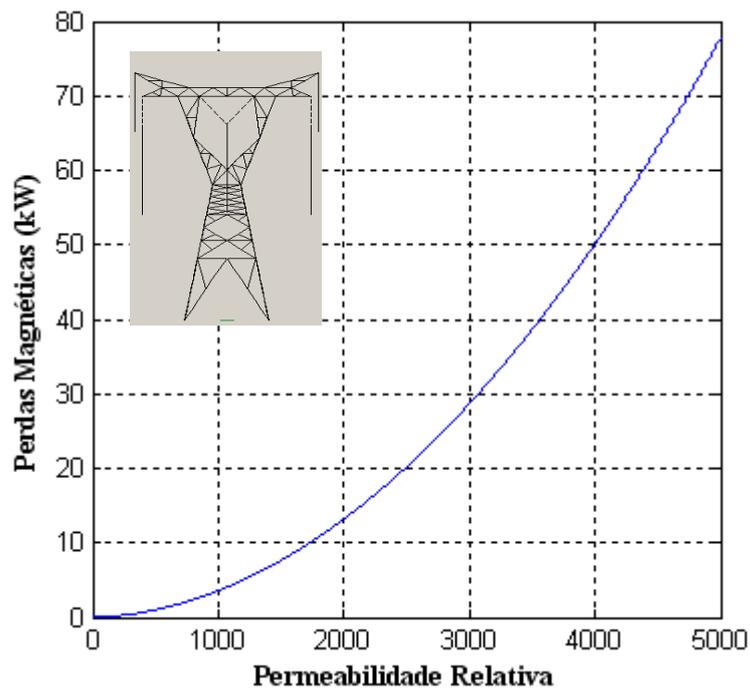


Figura 7.10 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

7.4.1.3. Nível 2

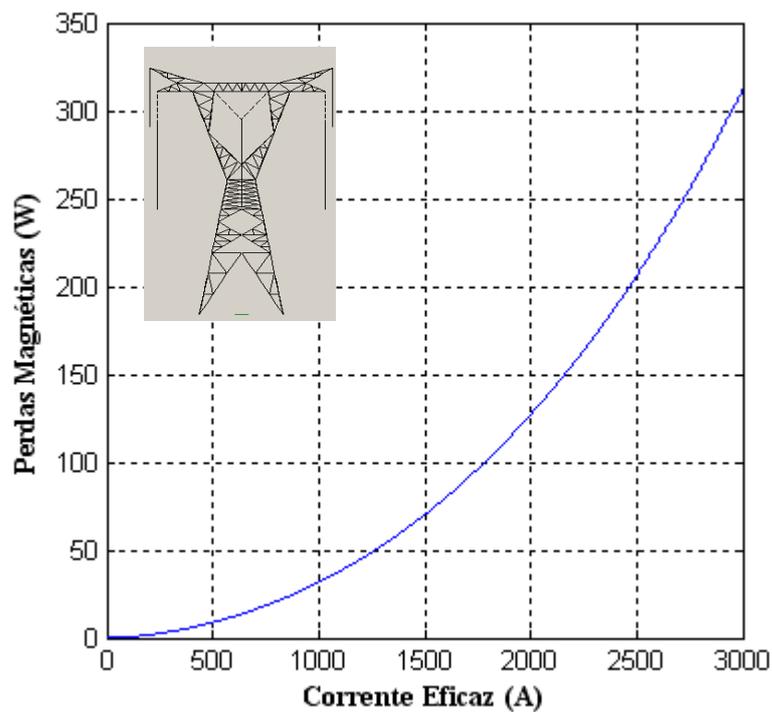


Figura 7.11 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

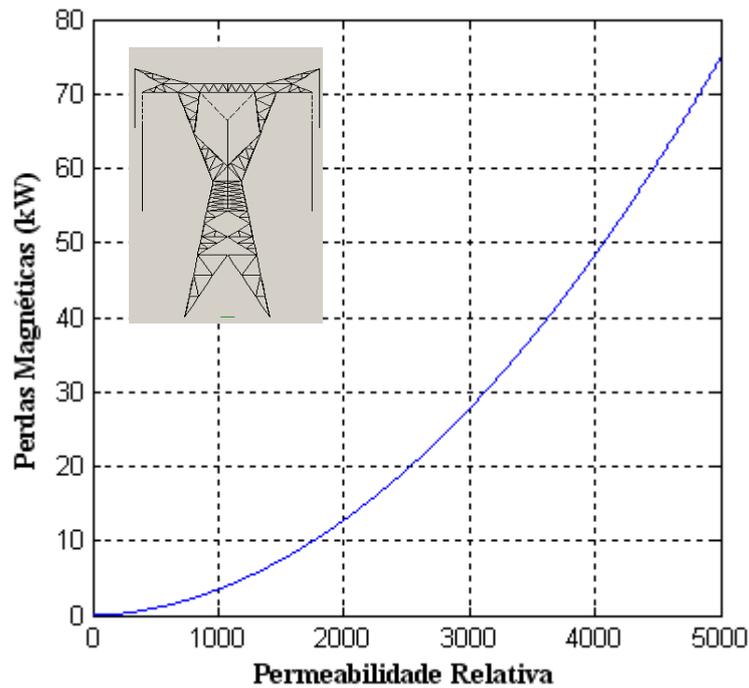


Figura 7.12 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

7.4.1.4. Comparação entre os níveis de discretização

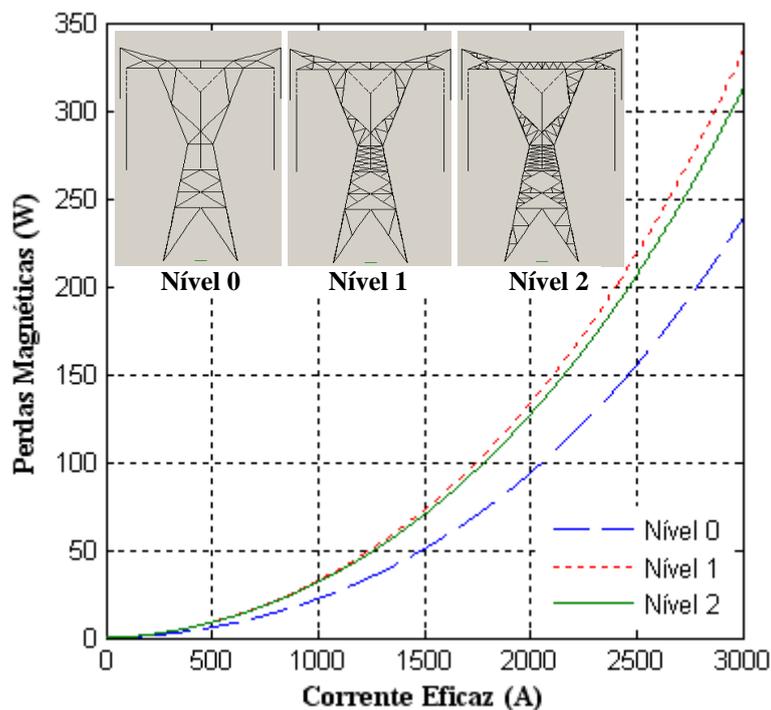


Figura 7.13 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

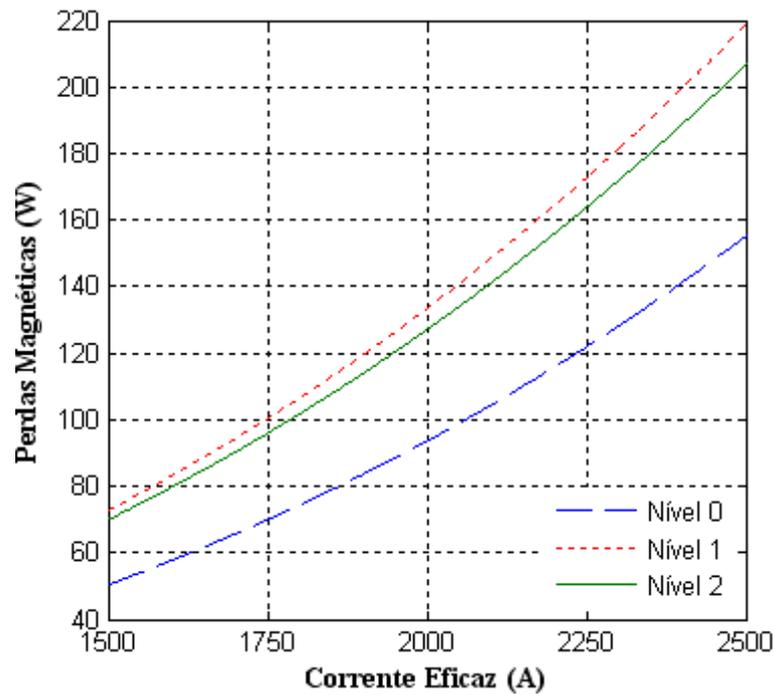


Figura 7.14 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz) na gama $1,5 \text{ kA} \leq I_{\text{eficaz,linha}} \leq 2,5 \text{ kA}$.

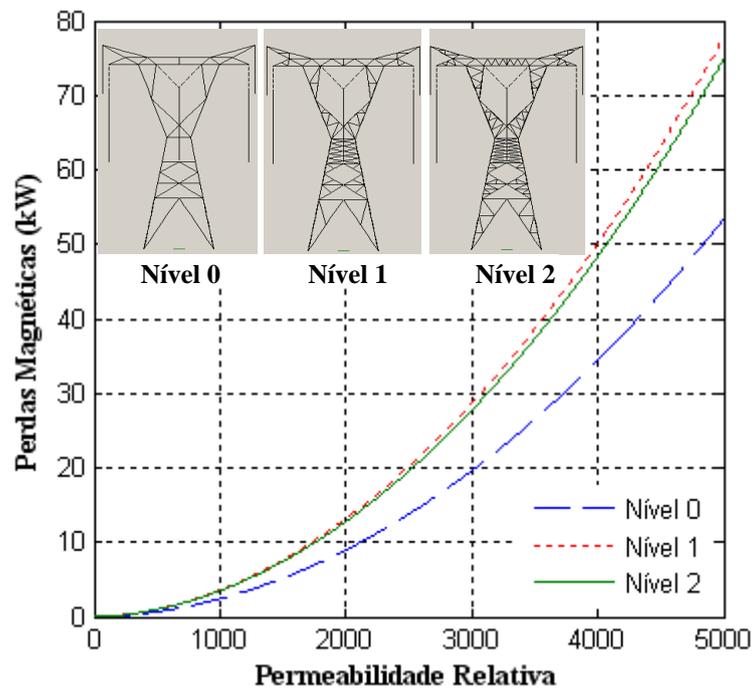


Figura 7.15 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

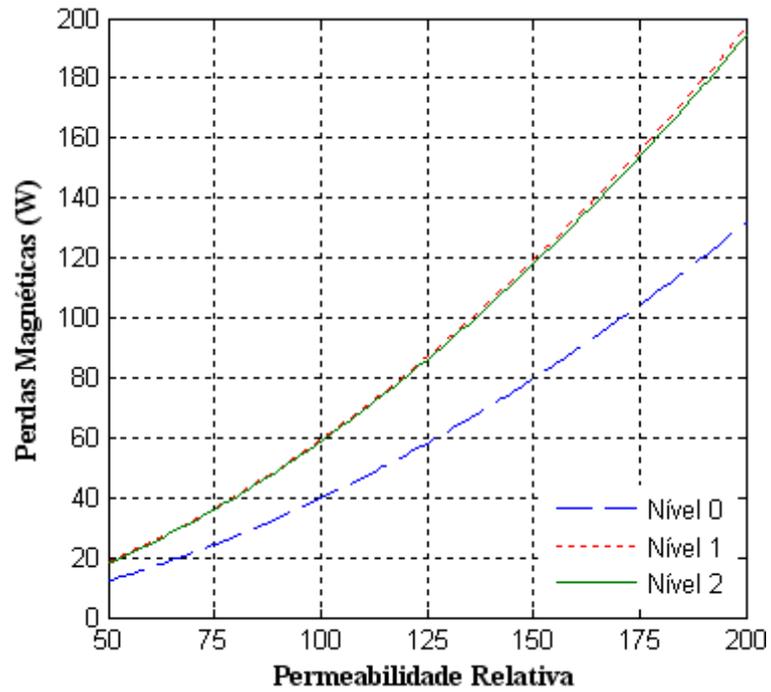


Figura 7.16 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa, na gama $50 \leq \mu_{relativa} \leq 200$, do material que compõe a estrutura.

7.4.2. Torre estaiada

7.4.2.1. Nível 0

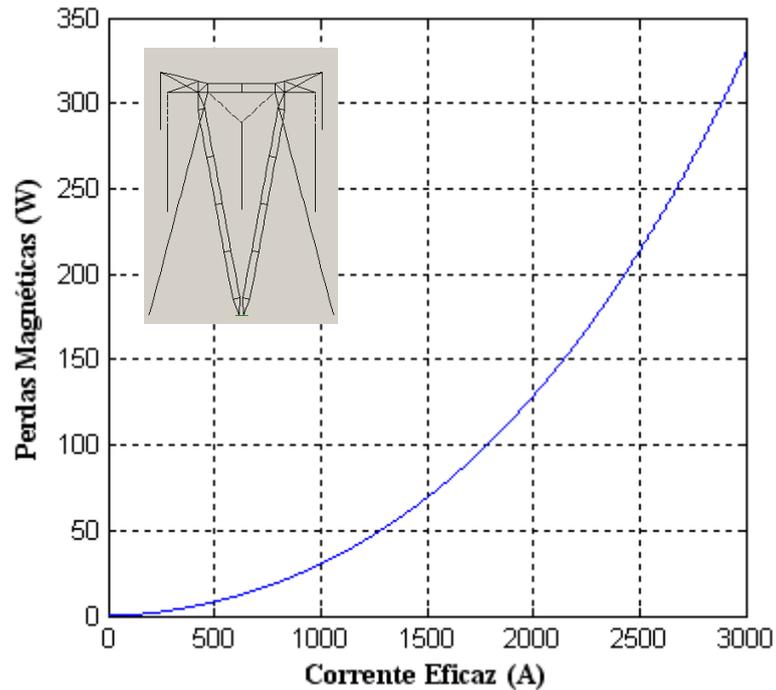


Figura 7.17 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

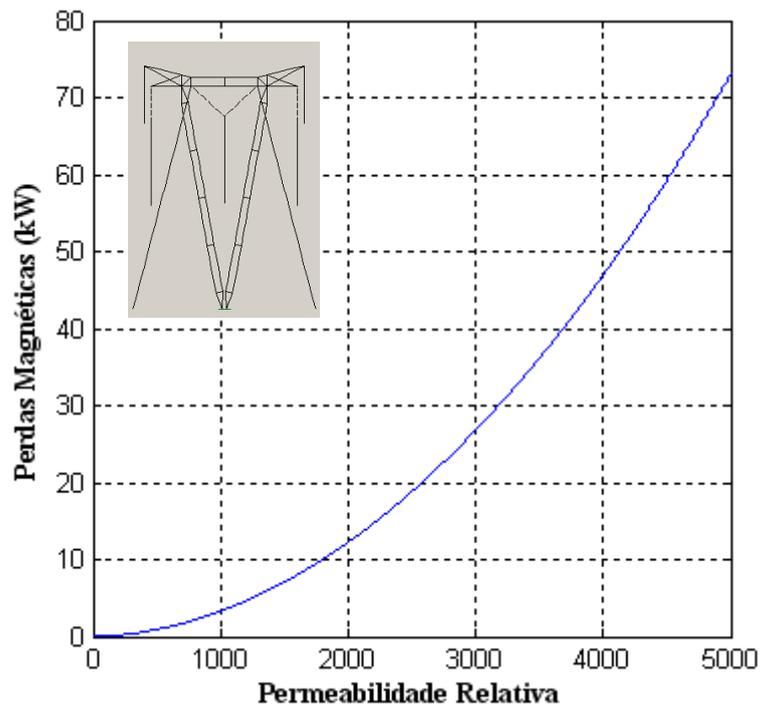


Figura 7.18 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

7.4.2.2. Nível 1

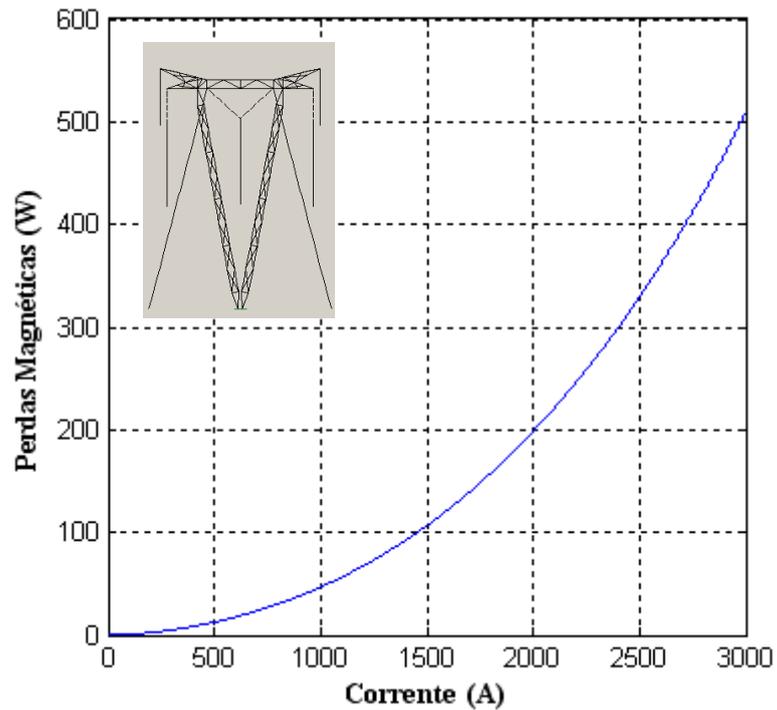


Figura 7.19 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

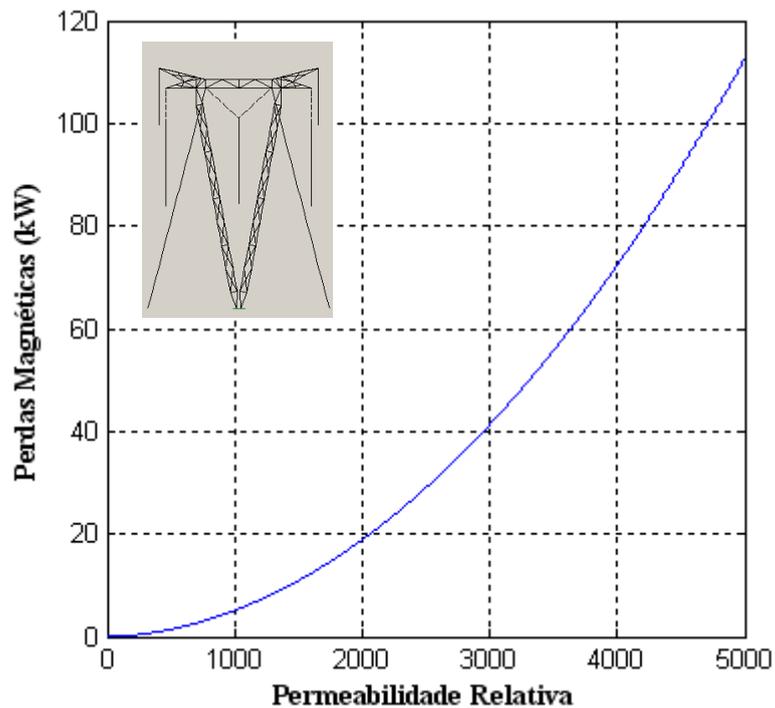


Figura 7.20 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

7.4.2.3. Nível 2

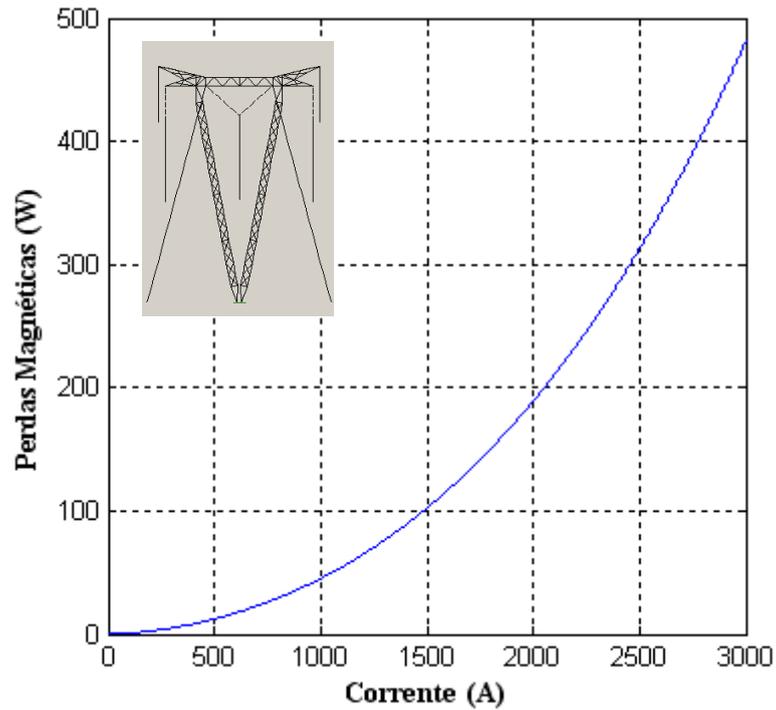


Figura 7.21 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

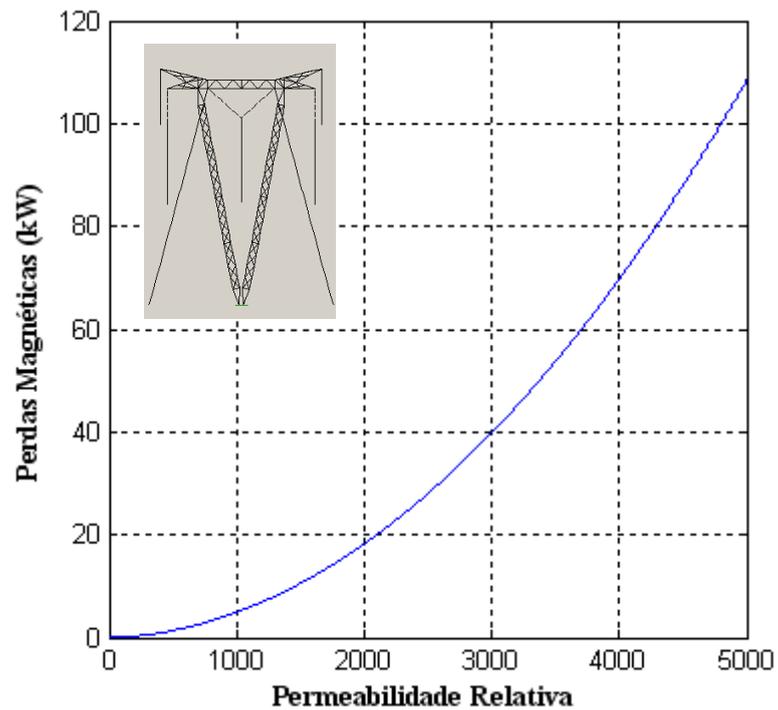


Figura 7.22 – Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

7.4.2.4. Comparação entre os níveis de discretização

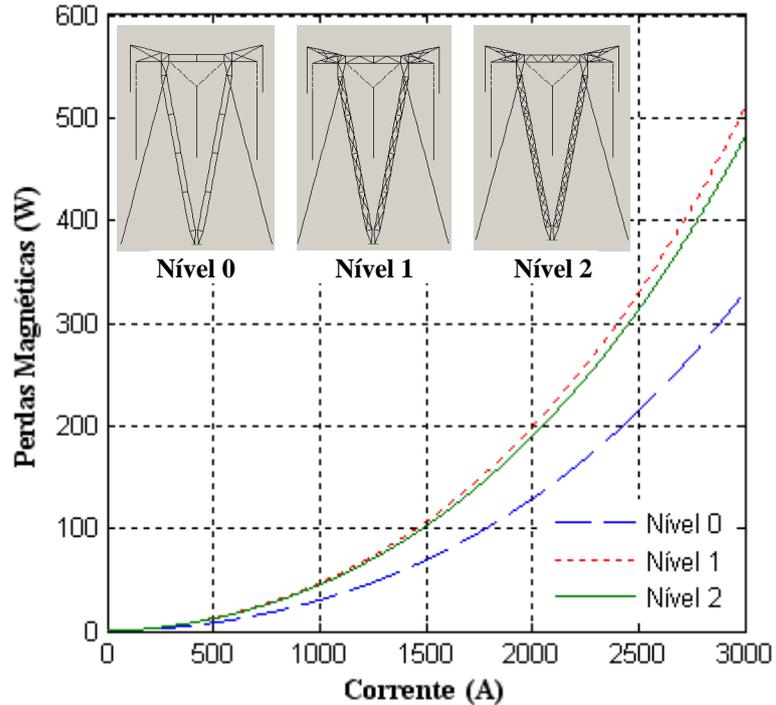


Figura 7.23 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz).

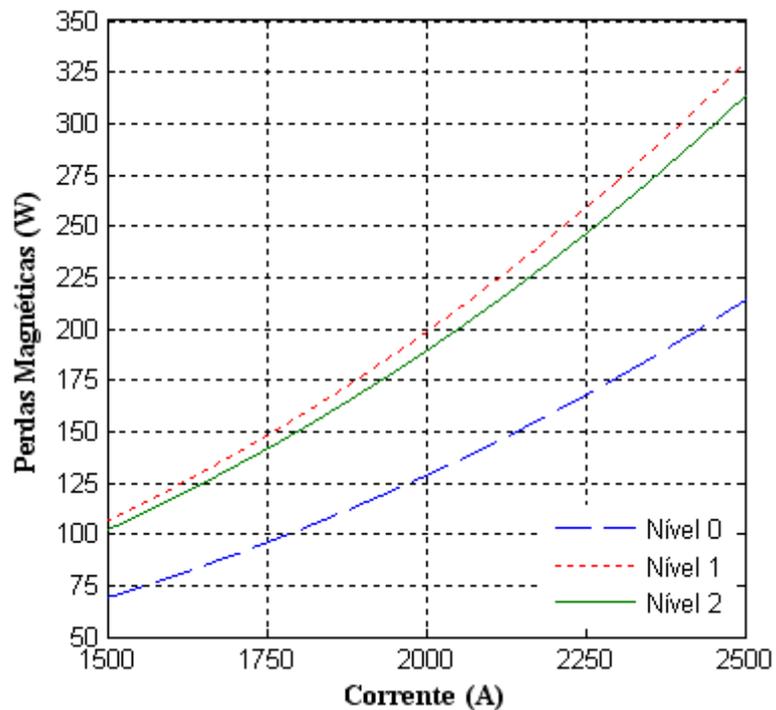


Figura 7.24 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e com frequência 60 Hz), na gama $1,5 \text{ kA} \leq I_{\text{eficaz, linha}} \leq 2,5 \text{ kA}$.

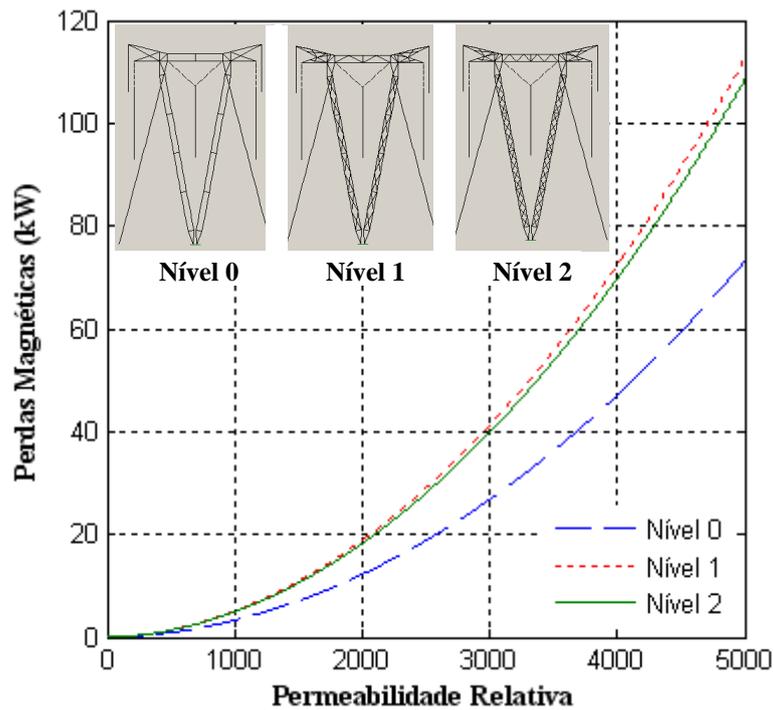


Figura 7.25 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

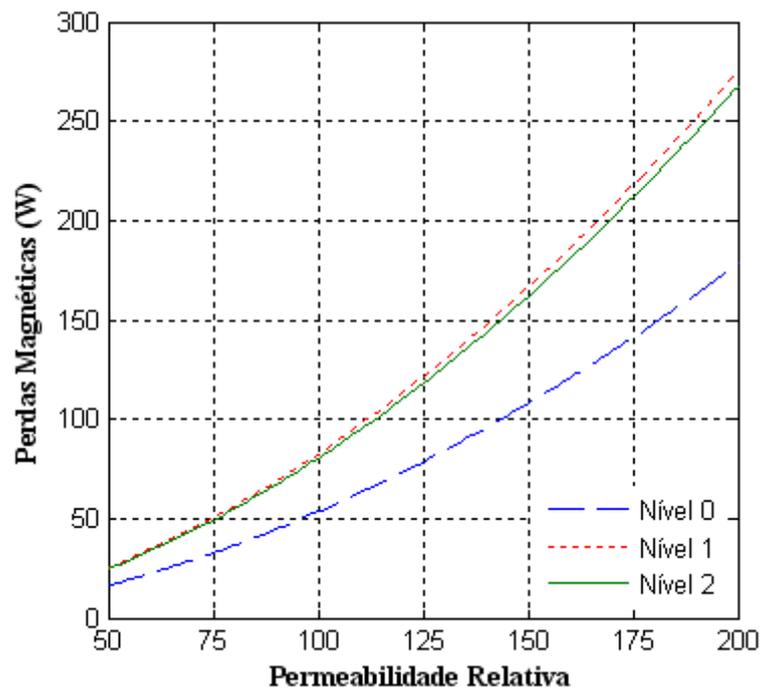


Figura 7.26 – Comparação entre os níveis de discretização: relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa, na gama $50 \leq \mu_{relativa} \leq 200$, do material que compõe a estrutura.

7.4.3. Comparação dos resultados entre as estruturas

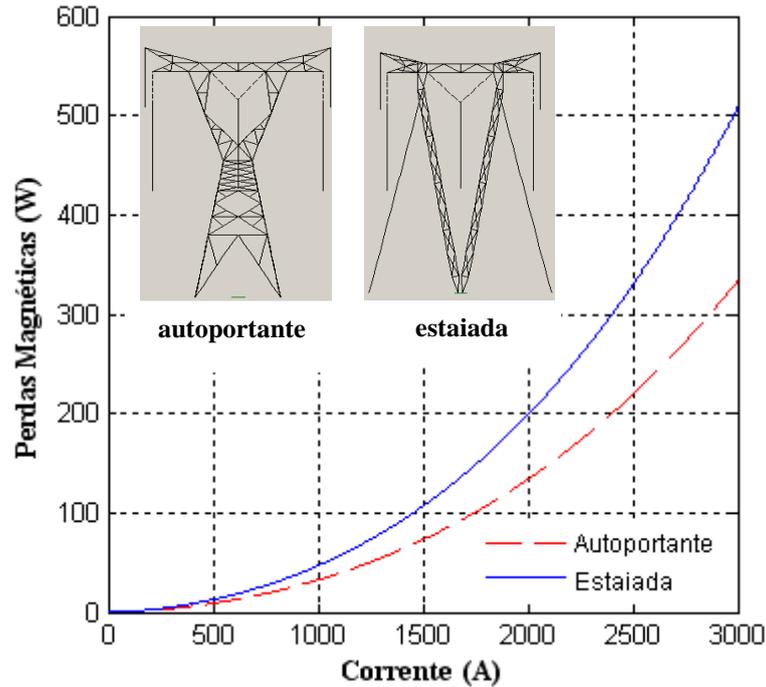


Figura 7.27 – Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e frequência 60 Hz).

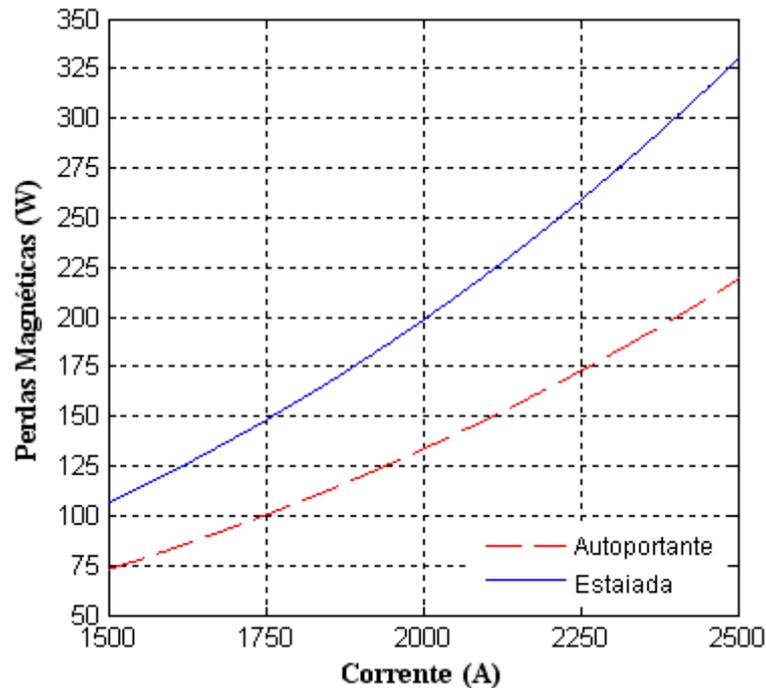


Figura 7.28 – Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor eficaz da corrente nas fases da linha (suposta senoidal, balanceada e frequência 60 Hz), na gama na gama $1,5 \text{ kA} \leq I_{\text{eficaz,linha}} \leq 2,5 \text{ kA}$.

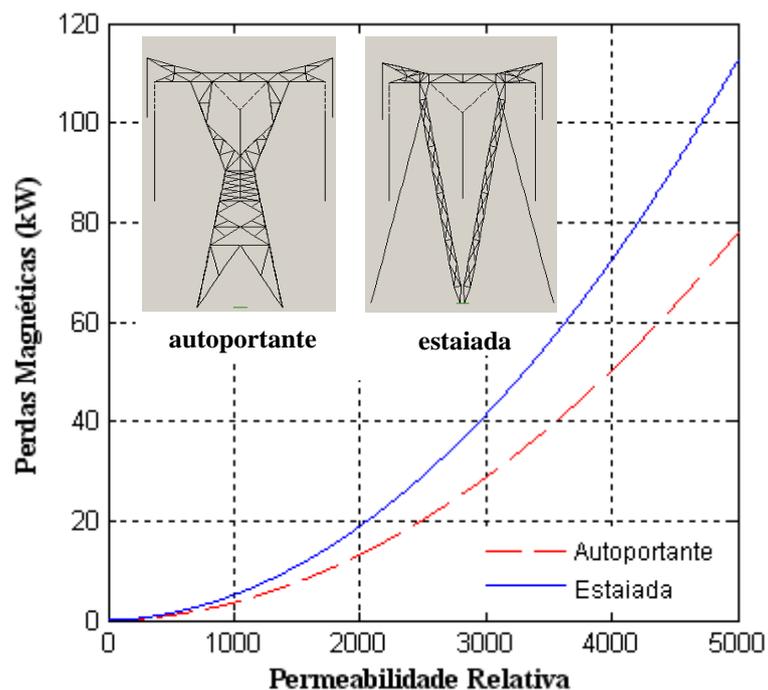


Figura 7.29 – Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa do material que compõe a estrutura.

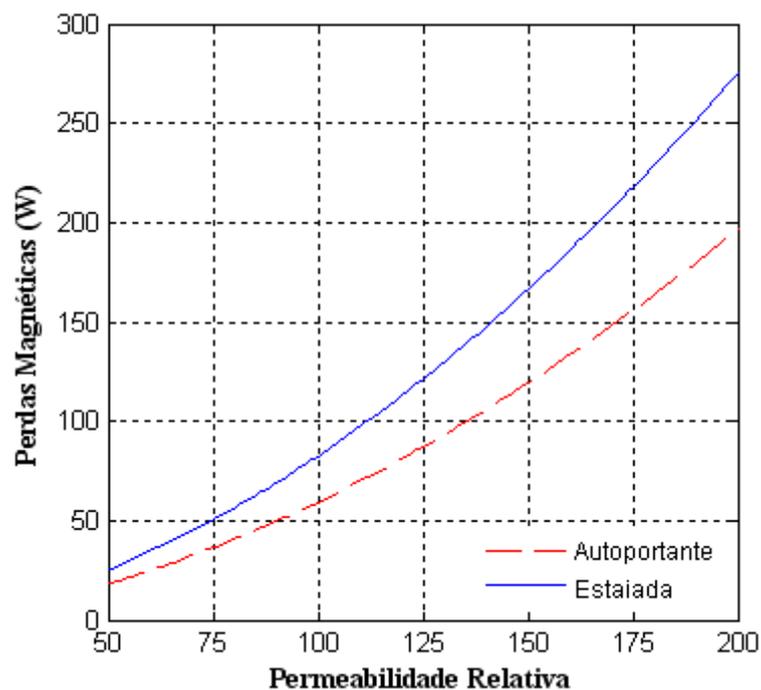


Figura 7.30 – Comparação entre as estruturas autoportante e estaiada para o nível 1 de discretização do modelo das torres. Relação entre o valor das perdas magnéticas e o valor da permeabilidade relativa, na gama $50 \leq \mu_{relativa} \leq 200$, do material que compõe a estrutura.

7.5. Análise dos resultados apresentados

Como apresentado pelos resultados obtidos, o comportamento das perdas magnéticas, a princípio, se mostra mais suscetível à variação da permeabilidade relativa do material do que a variação de corrente nas fases da linha. No entanto, a variação das perdas apresenta a mesma sensibilidade à variação destas grandezas, pois a indução magnética no material é diretamente proporcional as mesmas. Contudo, em uma situação real, onde não há uma padronização do material que compõe as torres de transmissão, a permeabilidade relativa pode ter uma gama mais variada que o carregamento da linha, o que torna a permeabilidade relativa um parâmetro de fundamental influência para as perdas numa estrutura. Como visto, estabelecendo um valor fixo para a corrente nas fases da linha e fazendo variar a permeabilidade do material, as perdas podem atingir ordem de grandeza que chega a dezenas de quilowatts.

Com relação aos níveis de discretização para o modelo das torres, observou-se nos resultados, para ambas as estruturas, que o comportamento das perdas registrado no nível 2 foi ligeiramente inferior ao obtido no nível 1. Visando compreender essa ocorrência, que não era prevista ser encontrada, recorreu-se aos dados obtidos das simulações feitas com o FDETP. Analisando a discretização dos eletrodos para ambas as estruturas, verificaram-se as seguintes distribuições:

Tabela 7.1 – Discretização dos eletrodos para a estrutura autoportante.

Estrutura	Número de eletrodos	Comprimento total de eletrodos (m)	Comprimento médio de cada eletrodo (m)	Nível
<i>Autoportante</i>	532	1174	2,21	<i>1</i>
	806	1459	1,81	<i>2</i>

Tabela 7.2 – Discretização dos eletrodos para a estrutura estaiada.

Estrutura	Número de eletrodos	Comprimento total de eletrodos (m)	Comprimento médio de cada eletrodo (m)	Nível
<i>Estaiada</i>	545	1116	2,05	<i>1</i>
	571	1160	2,03	<i>2</i>

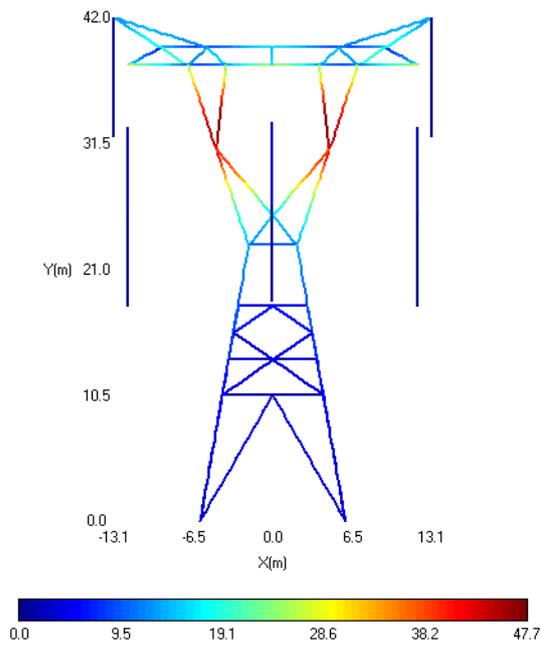
No cálculo das perdas magnéticas, como apresentado na metodologia proposta, quanto maior a discretização do modelo para as cantoneiras, maior é a sua proximidade de um cálculo integral. Consequentemente, os valores obtidos a partir do método serão ligeiramente menores, quanto maior for o nível de discretização do “material”. Durante a aplicação do

método aos ensaios, mais precisamente à configuração cantoneira solitária, este fato foi observado, porém não registrado neste trabalho. Naquela situação, apenas por verificação, o modelo para as cantoneiras foi discretizado em comprimentos de 0,01 m, ou seja, em 100 partições. Os resultados obtidos foram suavemente menores aos registrados pela discretização em 10 partições, como já apresentados neste trabalho. Como a diferença de resultados entre estas partições não se apresentaram significativas, optou-se por utilizar incrementos com 0,1 m de comprimento, pois exigiu menor esforço computacional e mais agilidade no cálculo das perdas.

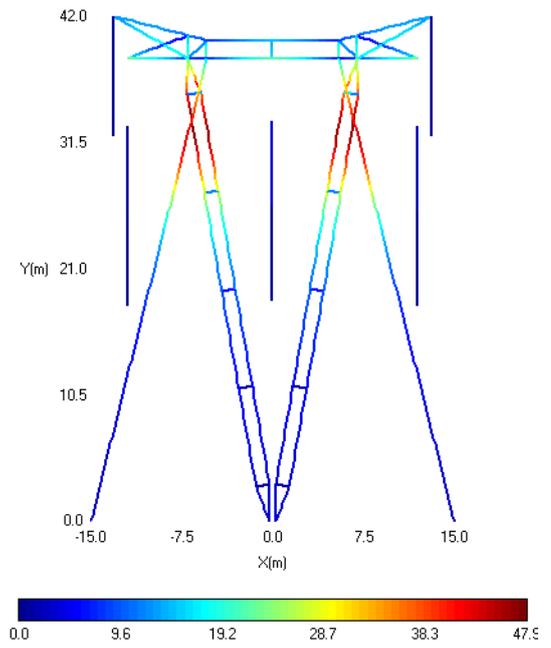
Neste caso, como o comprimento total de eletrodos apresenta a mesma ordem de grandeza para ambos os níveis, tanto na estrutura autoportante como na estaiada, e o nível de discretização para o nível 2 é superior ao nível 1, os resultados se apresentam consistentes com o método.

No contexto dos resultados comparativos entre as duas estruturas para o nível 1 de discretização, nota-se que os valores encontrados para perdas na estrutura estaiada são superiores aos apresentados na estrutura autoportante. Sem dúvida alguma, pelo fato da torre autoportante ser mais robusta e aparentemente com maior volume de material comparado à estaiada, este comportamento não era esperado. Contudo, pelos resultados terem sido obtidos por meio de simulação, o que não retrata a realidade com 100 % de exatidão, esta análise deve-se restringir aos dados obtidos pelas simulações, não cabendo tirar conclusões de fatos reais em cima de dados simulados.

Retornando aos dados apresentados pelas tabelas 7.1 e 7.2, nota-se, de fato, que o comprimento total de eletrodos utilizados para modelar a torre autoportante é maior que o utilizado para modelar a torre estaiada, porém esta diferença não justifica a tamanha discrepância entre os resultados obtidos. Buscando uma interpretação mais consistente para estes resultados, supôs-se que este efeito fosse causa da distribuição espacial da intensidade de campo magnético, onde se admitiu a hipótese do campo magnético ser mais intenso na região contida pelo material da estrutura estaiada. Para verificar a consistência desta hipótese foram feitas simulações com o programa FTDEP com o objetivo de possibilitar a visualização da distribuição espacial de campo magnético nas estruturas, como apresentado nas figuras a seguir. Os resultados apresentam uma vista frontal do modelo tridimensional das estruturas.

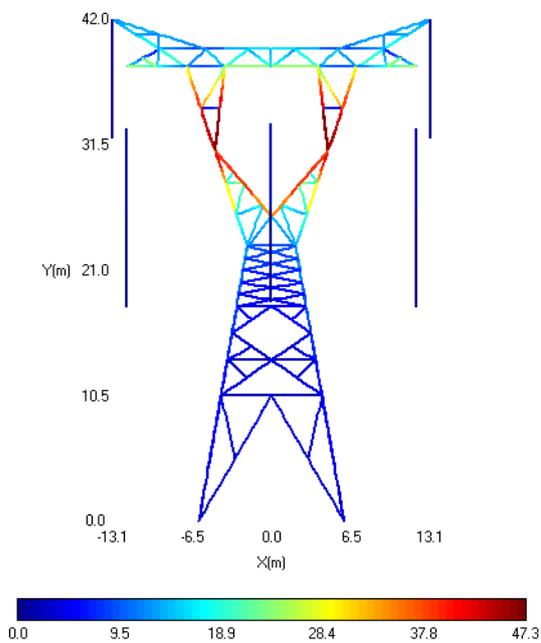


Torre autoportante – nível 0

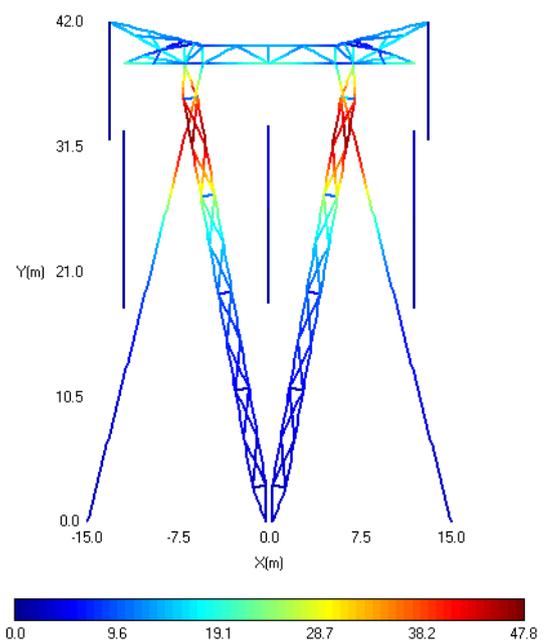


Torre estaiada – nível 0

Figura 7.31 – Distribuição espacial da componente longitudinal de campo magnético na região das estruturas. Subdivisão média dos eletrodos: 0,5 m; corrente nas fases da linha: 1 A; escala: 1 mA/m.



Torre autoportante – nível 1



Torre estaiada – nível 1

Figura 7.32 – Distribuição espacial da componente longitudinal de campo magnético na região das estruturas. Subdivisão média dos eletrodos: 0,5 m; corrente nas fases da linha: 1 A; escala: 1 mA/m.

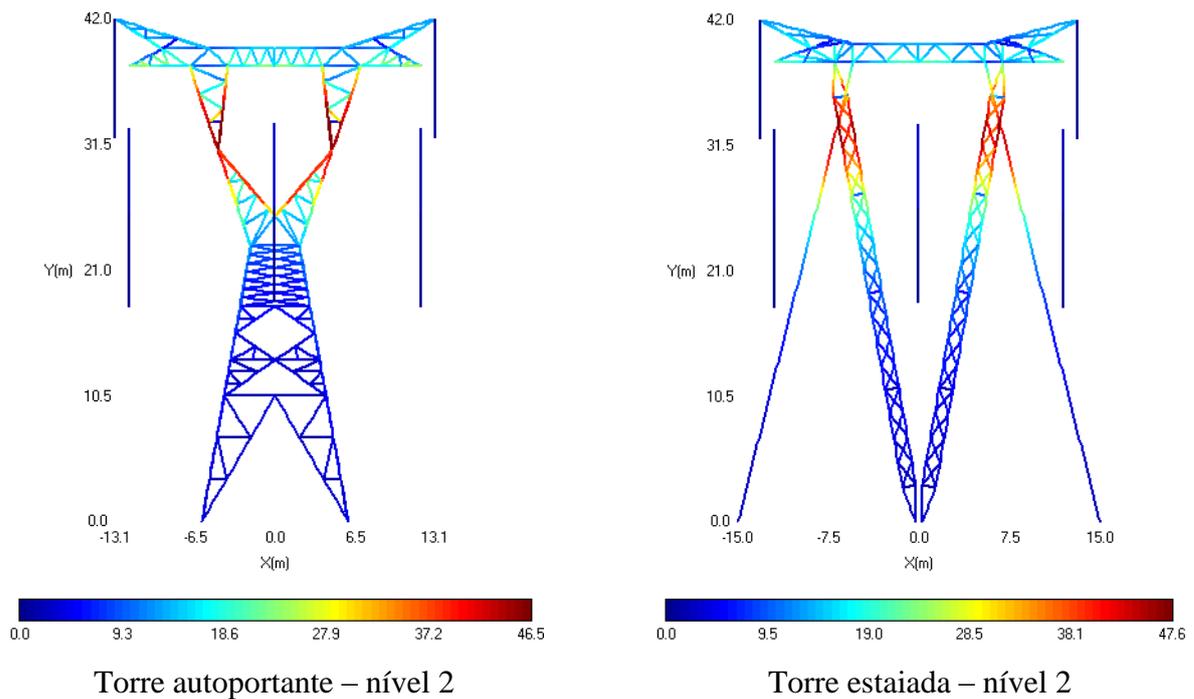


Figura 7.33 – Distribuição espacial da componente longitudinal de campo magnético na região das estruturas. Subdivisão média dos eletrodos: 0,5 m; corrente nas fases da linha: 1 A; escala: 1 mA/m.

Ainda assim, com a verificação da distribuição espacial do campo magnético nas estruturas, uma análise mais acurada sobre os resultados é extremamente complicada. De fato, o que pode se concluir sobre o comportamento observado é a suposição de que no modelo da torre estaiada, uma maior quantidade de eletrodos está sujeita a níveis de campo magnético mais intenso, afinal as perdas obtidas foram superiores às registradas pela estrutura autoportante.

Outra suposição que pode ser feita, está relacionada a uma possível imprecisão no modelo das torres. No entanto, sob o ponto de vista das perdas em si, independente de qual estrutura possui maior contribuição para o fenômeno, os resultados se apresentaram na mesma ordem de grandeza, o que é mais importante neste estudo.

Fazendo proveito das figuras que mostram a visualização da distribuição espacial de campo magnético nas estruturas, conclui-se que a porção das torres que mais contribui para as perdas magnéticas é a superior, situada nas proximidades dos cabos de fase. No caso da torre autoportante, a “cabeça da torre”.

Chegando ao ponto mais esperado deste trabalho, a análise dos resultados apresentados se concentra agora na importância que estes possuem dentro do cenário das perdas de potência em um sistema de transmissão, mais precisamente sob o aspecto econômico.

O projeto de uma linha de transmissão envolve uma seqüência de atividades, onde as interdependências dos parâmetros elétricos, mecânicos e ambientais que interferem no dimensionamento são estudados de modo a se obter o especificado desempenho operacional do empreendimento aliado aos menores custos possíveis.

Na transmissão em corrente alternada, considera-se como custo total da LT o somatório dos custos referentes às perdas elétricas, instalação, compensação de reativos, manutenção e operação. Os custos das perdas elétricas são devidos às perdas de potência e energia nos cabos condutores por efeitos Joule e corona. Neste aspecto, as perdas magnéticas nas estruturas nunca tiveram um estudo mais detalhado.

Para dar um breve diagnóstico qualitativo sobre qual a importância que as perdas magnéticas nas estruturas têm no contexto do custo total de empreendimento de uma linha de transmissão, este trabalho utilizou como ferramenta computacional o sistema ELEKTRA [30]. O programa ELEKTRA é uma ferramenta integradora de programas digitais e bancos de dados usados nos dimensionamentos elétricos e mecânicos e na verificação de desempenho da LT, considerando o meio ambiente e o cômputo dos custos de construção da linha e das perdas de energia e potência durante a sua vida útil.

Como dados de entrada no sistema computacional ELEKTRA, foram feitas as seguintes suposições:

- Configuração de feixes: estabelecida no projeto das linhas sustentadas pela torre autoportante, utilizada como estudo deste projeto;
- Corrente nas fases da linha: 1980 A;
- Vão médio: 400 m;
- Temperatura ambiente: 33 °C;
- Velocidade do vento: 1 m/s ;
- Radiação solar: 1000 W/m²;
- Coeficiente de absorção solar: 0,5;
- Coeficiente de Emissividade: 0,5;
- Parcela do comprimento da linha sob chuva: 25%;
- Coeficiente de superfície para o cálculo de perdas Corona: 0,6;

Obteve-se como resultado, para as perdas Joule e corona, os seguintes valores:

- i. Perdas Joule – 193 kW/km;
- ii. Perdas corona – 5,6 kW/km;

Para um vão médio de 400 m, os valores obtidos para perdas magnéticas nas estruturas, considerando o nível 1 de discretização, foram:

- i. Estrutura autoportante – 0,326 kW/km;
- ii. Estrutura estaiada – 0,485 kW/km.

Considerando 25 anos de vida econômica da linha, uma taxa financeira de atualização anual equivalente a 8% a. a. e um custo das perdas de energia sendo de 113 R\$/ MW, esta linha, fornecendo 1544 MW, apresenta um custo com as perdas Joule e corona da mesma ordem de grandeza do custo de instalação da linha. Sendo assim, a título de exemplo, um acréscimo de 10 % nos custos com as perdas do sistema, acarretaria um acréscimo de 5% no custo de empreendimento da linha.

Com base nos dados obtidos, as perdas nas estruturas são da ordem de 0,5% com relação às perdas Joule e corona. Consequentemente, “para esta situação”, o impacto que as perdas nas estruturas provocam para o custo total de um empreendimento são muito pequenos, não sendo viável a tomada de medidas preventivas e de controle para minimizar este fenômeno.

Fazendo a suposição que o material que compõe as estruturas tenha uma permeabilidade relativa de 1000, as perdas magnéticas a serem incluídas neste cenário corresponderiam a ordem de 15 kW/km, ou seja, este valor representa 300 % das perdas corona.

CAPÍTULO 8

Considerações Finais

Como visto, o ponto de partida deste trabalho foi a utilização da modelagem feita para determinar as perdas magnéticas no material que compõe um conjunto de cantoneiras utilizadas na construção de torres de transmissão. No entanto, este modelo era ainda insuficiente para o objetivo deste trabalho, visto que o comportamento magnético do material, quando submetido à ação de um campo magnético, não era conhecido. Sendo assim, foi feita uma solicitação de ensaio ao Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas da Eletrobrás Cepel, para que a curva que relaciona B_m e H_m do material fosse levantada.

De posse destes dados, foi proposta uma metodologia para o cálculo de perdas magnéticas em cantoneiras quando submetidas a campos magnéticos com qualquer orientação espacial, afinal aquele modelo de partida não contemplava esse quesito. Visando ir além de um estudo teórico, este trabalho avançou para a certificação do método proposto. Neste contexto, foi montada uma estrutura para ensaios que contemplasse a verificação do método.

Através da realização dos ensaios, verificou-se que o método é eficaz quando as perdas são calculadas para cantoneiras isoladas. No entanto, com a presença de outras amostras, formado um conjunto, o método se mostrou ineficiente, porém restou dúvida: em que etapa o método é falho? Será mesmo a ineficácia no modelo adotado para o cálculo do campo magnético?! Enfim, esta dúvida só poderá ser esclarecida quando o método utilizar de um modelo que permita calcular o campo magnético levando em conta as não linearidades do fenômeno, como por exemplo, efeitos de borda e de distorções do campo produzidas pela presença, nas proximidades, de outros materiais ferromagnéticos.

Sobre a importância do fenômeno estudado dentro cenário das perdas de potência de um sistema de transmissão, este trabalho aconselha uma verificação, confiável e segura, sobre a natureza magnética das cantoneiras que formam a estruturas das torres de transmissão, visto que a permeabilidade do material é um parâmetro crucial para uma contribuição apreciável das perdas em um sistema elétrico.

CAPÍTULO 9

Referências Bibliográficas

- [1] – PORTELA, C., 2006, *Discussão de Alguns Aspectos Relacionados com Perdas nas Estruturas das Linhas de Transmissão e Inerente Efeito nas Perdas e Parâmetros das Linhas*, Proposta COPPETEC PESC – 6763, Contrato n. 02/037/2005.
- [2] – SADIKU, M. N. O., 2004, *Elementos de Eletromagnetismo*. 3 ed. Porto Alegre, Bookmann.
- [3] – FISHBANE, P. M., GASIOROWICZ, S., THORNTON, S. T., 1996, *Physics for Scientists and Engineers*. 2 ed. New Jersey, Prentice Hall.
- [4] BERTOTTI, G., “General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 24, pp. 621-630, Jan. 1988.
- [5] – FIORILLO, F., NOVIKOV, A., 1990. “An Improved Approach to Power Losses in Magnetic Laminations under Nonsinusoidal Induction Waveform”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.26, pp 2904-2910.
- [6] – BATISTELA, N. J., BASTOS, J. P. A., SADOWSKI, N., et al., “Uma Metodologia de Caracterização Magnética de Aço Silício e Aplicações na Predição das Perdas Magnéticas sob Regimes de Indução Senoidal e Distorcido”, Congreso Reginal de Ensayos No Destructivos y Estructurales, Conferencia sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida - CORENDE 2000, pp 283-288, 3 a 5 de outubro de 2000, Mar Del Plata.
- [7]- BATISTELA, N. J., SADOWSKI, N., CARLSON, R., et al., “ Caracterização Magnética de Lâminas de Aço Silício e a Evolução das Perdas no Ferro sob Vários Regimes de Indução”, *Revista Controle & Automação da Sociedade Brasileira de Automática (SBA)*, São Paulo, Brasil, v. 13, pp.156-164, 2002.

- [8] – LANDGRAF, F. J. G., EMURA, M., TEIXEIRA J. C., et al 1999, “Anisotropy of the Magnetic Losses Components in Semi-Processed Electrical Steels”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 196-197, pp. 380-381.
- [9] – LANDGRAF, F. J. G., EMURA, M., TEIXEIRA J. C., et al 2000, “Effect of Grain Size, Deformation, Aging and Anisotropy on Hysteresis Loss of Electrical Steels”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, pp. 97-99.
- [10] – LAVERS, J. D., BIRINGER, P. P., HOLLITSCHER, H., 1978, “A simple method of estimating the minor loop hysteresis loss in thin laminations” *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 14, n.5, pp. 386-388.
- [11] – BATISTELA, N. J., PERIN, A. J., 1995, “A Fixed Frequency Sliding Mode Control For Voltage Source Inverter”, *III Brazilian Power Electronics Conference - COBEP'95*, pp. 229-234, São Paulo.
- [12] – BERTOTTI, G., 1983, “Space-Time Correlation Properties of the Magnetization Process and Eddy Current Losses: Theory”, *J. Appl. Phys.*, v. 54, n. 9, pp. 5293 – 5305. [9]
- [13] – SENS, M. A., 2010, *Propriedades Elétricas e Magnéticas de Cantoneiras de Aço Galvanizado para Torres de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica*, relatório n. 36458, Eletrobrás Cepel, Rio de Janeiro.
- [14] – Datasheet Norma D6000. Disponível em: [HTTP://www.calplus.de/downloads/pdf/LEMNorma6000.pdf](http://www.calplus.de/downloads/pdf/LEMNorma6000.pdf). Acesso em: 22 out. 2010, 03:38:47.
- [15] – Datasheet Fonte Universal HP 3245A. Disponível em: <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsx?cc=BR&lc=por&nid=-536900193.536896849&pageMode=PL>. Acesso em: 05 nov. 2010, 14:08:12.

[16] – Datasheet Fonte Califórnia 251 TCA. Disponível em: http://www.teknetelectronics.com/DataSheet/CALIFORNIA/CALIF_TSeries122426.pdf.

Acesso em: 05 nov. 2010, 14:40:09.

[17] – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5161: Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – Verificação das Propriedades*. Rio de Janeiro, Jul. 1977, 35 p.

[18] – ALONSO, M., FINN, E. J., 1972, *Física: um curso universitário*. 1 ed., v. 2 – Campos e Ondas. São Paulo, Edgard Blücher Ltda.

[19] – Datasheet Multímetro Digital HP 973A. Disponível em: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/00973-90001.pdf>. Acesso em: 03 Jan. 2011, 04:56:26.

[20] – Datasheet Voltímetro Digital HP 3465A. Disponível em: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/03465-90003.pdf>. Acesso em: 03 Jan. 2011, 19:32:15.

[21] – Datasheet Fonte de Corrente MCCB-250. Disponível em: <http://www.vanguard-instruments.com/categories/circuit-breaker-timers/mccb-250>. Acesso em: 07 Jan. 2011, 05:18:54.

[22] – PINTO, R.L.F., DOMINGUES, L.A.M.C., BARBOSA, C.R.N., *Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Cálculo de Campos Elétricos, Magnéticos e Induções – Programa CAMPEM*, Depto. Linhas e Estações, Eletrobrás Cepel, Rio de Janeiro, 2005.

[23] – DENO, D. W., ZAFFANELLA, L. E., 1982, “Field Effects of Overhead Transmission Lines and Stations”. In: *Transmission Lines Reference Book/345 kV and Above*, 2 ed., chapter 8, pp. 415-417, New York, USA, EPRI.

- [24] – SALARI, J. C., PORTELA, C., “A methodology for electromagnetic transients calculation – an application for the calculation of lightning propagation in transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, pp. 527–536, Jan. 2007.
- [25] – SALARI, J. C., PORTELA, C., “Comparative analysis of two- and three-dimensional methods for computing electric and magnetic fields generated by overhead transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 1, pp. 338 –344, Jan. 2009.
- [26] – SALARI, J. C., NETO, A. M., FILHO, J. I. S., “Comparação entre Cálculos Bidimensionais e Tridimensionais do Campo Eletromagnético Gerado por Linhas Aéreas de Transmissão”, *SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Grupo XIII, Rio de Janeiro, Out. 2007.
- [27] – FUCHS, R. D., ALMEIDA, M. T., 1977, *Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas*. v. 2, 1 ed. Rio de Janeiro, LTC/EFEI.
- [28] - GARY, C., MOREAU, M., 1976, *L'effet de Couronne en Tension Alternative*. 1 ed. Paris, France, Eyrolles.
- [29] – Disponível em: http://jie.itaipu.gov.br/print_node.php?secao=turbinadas1&nid=707. Acesso em: 23 Jan. 2011, 17:19:15.
- [30] – SILVA, J. I., SALARI, J. C., DART, F. C., “Integração de Modelos Matemáticos para o Dimensionamento Otimizado de Linhas de Transmissão com Feixes Convencionais e Não Convencionais”, XIII ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, Maio 2009.