



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia e Informática - CEEI

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Trabalho de conclusão de curso

**MEDIÇÃO E SEPARAÇÃO DE PERDAS
MAGNÉTICAS EM LIGAS Fe-Si DE GRÃOS
ORIENTADOS**

CLEBER CAMPOS BATISTA JUNIOR

Campina Grande – PB
Maio de 2009

MEDIÇÃO E SEPARAÇÃO DE PERDAS MAGNÉTICAS EM LIGAS Fe-Si DE GRÃOS ORIENTADOS

CLEBER CAMPOS BATISTA JUNIOR

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.*

Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra
Orientador

Prof. Talvanes Meneses Oliveira
Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra
Orientador

Prof. Eurico Bezerra de Souza Filho

Campina Grande – PB
Maio de 2009

Agradecimentos

Aos meus pais, professores e amigos que de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação.

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

MEDIÇÃO E SEPARAÇÃO DE PERDAS MAGNÉTICAS EM LIGAS Fe-Si DE GRÃOS ORIENTADOS

CLEBER CAMPOS BATISTA JUNIOR

Campina Grande – PB
Maio/2009

Orientador: Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

RESUMO: O presente trabalho aborda o assunto das perdas magnéticas em aços elétricos. São discutidas as principais características dos aços elétricos e suas propriedades. Também é discutida a importância da redução das perdas em equipamentos elétricos utilizados na indústria. No capítulo cinco é mostrado e analisado o processo de separação de perdas em uma liga Fe-Si de grãos orientados utilizada em transformadores de núcleo toroidal.

Abstract of Conclusion Course Work presented to Federal University of Campina Grande as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

MEASUREMENT AND SEPARATION OF MAGNETIC LOSSES IN AN ALLOY OF FE-SI GRAIN-ORIENTED

CLEBER CAMPOS BATISTA JUNIOR

Campina Grande – PB
May/2009

Advisor: Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

ABSTRACT: The present work explores the issue of magnetic losses in electrical steels. The main characteristics of electrical steels and their properties are discussed. The importance of reducing losses in electrical equipment used in industry is discussed too. In chapter five is shown and analyzed the process of separation of losses in an alloy of Fe-Si grain oriented used in transformers with toroidal core.

Sumário

SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS E TABELAS	7
1. INTRODUÇÃO	8
1.1. OBJETIVOS	8
1.1.1. OBJETIVO GERAL	8
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.2. METODOLOGIA	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE OS AÇOS ELÉTRICOS E SUAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	9
2.1. INTRODUÇÃO	9
2.2. A PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DOS AÇOS ELÉTRICOS	10
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS ELÉTRICOS	12
2.3.1 AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO ORIENTADO (GO)	12
2.3.1 AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO NÃO-ORIENTADO (GNO)	13
3. A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E A IMPORTÂNCIA DA REDUÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS	15
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE AS PERDAS MAGNÉTICAS	17
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	17
4.2. PERDAS PARASÍTICAS CLÁSSICAS	18
4.3. PERDAS HISTERÉTICAS	19
4.4. PERDAS ANÔMALAS	20
4.5. PERDAS TOTAIS	20
5. ENSAIO DE MEDIÇÃO DE PERDAS EM UMA LIGA FE-SI DE GRÃOS ORIENTADOS	21
5.1. OBJETIVO DO ENSAIO DE MEDIÇÃO DE PERDAS	21
5.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
5.3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TRANSFORMADOR SOB ENSAIO	23
5.3.1. CARACTERÍSTICA DOS ENROLAMENTOS	23
5.3.2. CARACTERÍSTICA DO NÚCLEO	23
5.4. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	24
5.5. MEDIÇÃO E SEPARAÇÃO DAS PERDAS - ANÁLISE DOS RESULTADOS	26
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
7.1. WEBLIOGRAFIA	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação do aspecto dos grãos após recozimento final num aço semiprocessado (a) e num aço totalmente processado (b) . Espessura da chapa 0,5mm.	12
Figura 2 – Correntes parasitas em uma seção reta de uma lâmina de material ferromagnético.	16
Figura 3 – Ciclo de histerese para diferentes valores de campo magnético aplicado.	17
Figura 4 – Transformador em forma de toroide composto por uma liga Fe-Si de grãos orientados no núcleo e fios geminados formando os enrolamentos ($n = 1:1$).	21
Figura 5 – Esquema do ensaio de medição de perdas	22
Figura 6 – Osciloscópio da Agilent Technologies utilizado no ensaio de medição de perdas	23
Figura 7 – tensão senoidal a 60Hz $v(t)$, corrente de magnetização $i(t)$ e potência dissipada $p(t)$ fornecida pelo osciloscópio DSO3000 da Agilent Technologies.	25
Figura 8 – formas de onda dos sinais de tensão, corrente e potência à frequência de 2 Hz.	26
Figura 9 – distorção encontrada no sinal de tensão $v(t)$ a 40 Hz.	26
Figura 10 – Perdas Totais (em J/Kg) vs Frequência de ensaio (em Hz)	27
Figura 11 – Ajuste da curva de perdas e coeficientes da equação 5.10.	28
Figuras 12 – Componentes das perdas totais em função da frequência.	29
Figuras 13 – Componentes das perdas totais, em J/Kg, em função da frequência.	31
Figuras 14 – Componentes das perdas totais, em W/Kg, em função da frequência.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimento Pela Lei Da Eficiência Energética	14
Tabela 2 - Perdas magnéticas associadas à frequência de ensaio para uma indução de 1,5 T.	24
Tabela 3 - Perdas totais e suas componentes em função da frequência de ensaio	30

1. Introdução

Durante o Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, será apresentado um estudo das perdas magnéticas em uma liga Fe-Si de grãos orientados utilizada em transformadores de núcleo toroidal. Tal estudo consiste no levantamento e separação dos diferentes tipos de perdas segundo os desenvolvimentos de Bertotti (1988). Será apresentado, também, um estudo sobre a importância da redução das perdas magnéticas em ligas Fe-Si utilizadas em motores de indução empregados na indústria.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar as perdas magnéticas em ligas Fe-Si e mostrar a importância da redução destas perdas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar as perdas magnéticas em ligas Fe-Si de grãos orientados utilizadas em transformadores especiais de núcleo toroidal.
- Medir as perdas totais com frequência variável para um $B_{\text{máx}}$ de 1,5 T.

- Separar as perdas totais em perdas histeréticas, perdas parasíticas clássicas e perdas anômalas.
- Medir as perdas totais na frequência industrial para diferentes valores de indução de pico.
- Mostrar a importância da redução das perdas histeréticas nas ligas Fe-Si encontradas nos motores de indução utilizados na indústria.

1.2. Metodologia

A metodologia utilizada consiste em fazer uma revisão bibliográfica que apresente e justifique a necessidade do estudo das perdas magnéticas dos materiais encontrados nos núcleos dos transformadores de potência e nos motores de indução utilizados na indústria. Uma liga Fe-Si de grãos orientados em forma de toroide será submetida ao ensaio de medição de perdas e o tratamento dos dados será feito utilizando-se uma plataforma computacional que ao final do estudo deverá apresentar a curva de perdas à frequência variável e as perdas totais separadas em suas componentes segundo os desenvolvimentos de Bertotti (1988).

2. Fundamentação Teórica Sobre os Aços Elétricos e Suas Propriedades Magnéticas

2.1. Introdução

A história dos aços elétricos no mundo se confunde com a história da indústria da eletricidade, que nasce em 1880. A importância dos aços ao silício foi rapidamente reconhecida. Os aços de grão orientado foram desenvolvidos em 1934. No Brasil, a Acesita iniciou produção de aço GNO em 1956, pelo processo de laminação a quente de pacotes. Em 1979 iniciou a produção de aço GNO laminado a frio, e em 1981 a de aço GO, ambos com assistência técnica da Armco.

Aços elétricos interessam a dois segmentos econômicos onde o Brasil tem engenharia forte, a siderurgia e a indústria da eletricidade. Um por cento do volume total de aços produzidos anualmente é utilizado por suas propriedades magnéticas. Do

total de 7 milhões de toneladas anuais, 1 milhão de toneladas são usadas em transformadores (os aços chamados de grão-orientado - GO), 4 milhões são usados em motores elétricos de bom rendimento elétrico e 2 milhões de toneladas são aço tipo 1006 são usados nas aplicações de menor exigência.

Nos últimos dez anos várias aciarias internacionais e nacionais têm lançado produtos específicos para o mercado de aços elétricos, alterando composição química e processamento termomecânico de maneira a obter melhor desempenho em termos de perdas elétricas. Simultaneamente, os fabricantes de componentes eletromagnéticos têm aperfeiçoado seu projeto elétrico, visando redução de dimensões e de massa de aço utilizada.

2.2. A Permeabilidade Magnética Dos Aços Elétricos

Os aços elétricos são utilizados por terem uma qualidade única, indisputada por outros metais, polímeros ou cerâmicas: sua capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado. Essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas: motores, geradores, transformadores, etc. Essa propriedade especial, a capacidade de amplificação do campo magnético, é conhecida como permeabilidade magnética. A palavra permeabilidade reflete a idéia que os engenheiros elétricos do século XIX faziam do fenômeno, ou seja, uma medida da facilidade com que o fluxo magnético atravessava o material. Hoje sabemos que os átomos de ferro de um objeto de aço carregam um magnetismo intrínseco, um "momento magnético atômico", mesmo quando parece desmagnetizado. Chamamos de "momento magnético" por que o magnetismo dos átomos vem do movimento de rotação dos elétrons, ou seja, do seu momento angular. Basta que o objeto seja exposto a um campo magnético externo (o campo H , dado em A/m), vindo de um ímã ou de uma corrente elétrica, para que os "momentos magnéticos atômicos" se orientem e induzam, no espaço ao seu redor, um campo magnético muito maior que o campo externamente aplicado. Assim, a permeabilidade magnética pode ser melhor entendida se vista como um poder amplificador do material. Dizer que um aço tem permeabilidade magnética de 5.000 quer dizer que ele amplifica 5.000 vezes o campo magnético nele aplicado. Essa propriedade se aplica, por exemplo, no caso do motor elétrico. O torque de um motor está associado ao campo magnético no entreferro (gap)

entre o estator e o rotor. Em torno de 99,9% do campo magnético que existe no entreferro da máquina foi originado no interior do aço, resultado do alinhamento dos "momentos magnéticos atômicos" dos átomos de ferro que o compõe.

A intensidade do campo magnético no interior do material é chamada de indução magnética, pois esse magnetismo foi "induzido" pelo campo externamente aplicado. Essa propriedade, a indução magnética, é medida em Gauss (no sistema cgs) ou em tesla (no sistema MKS). A permeabilidade magnética é a relação entre o valor da indução magnética e a intensidade do campo magnético que a criou, e não tem unidade: é o fator de amplificação.

A permeabilidade magnética é calculada pela expressão $\mu = B / \mu_0 H$ (onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ henry/m). O fabricante de um motor gostaria de trabalhar com a maior indução magnética possível. Entretanto, ele está limitado por duas condicionantes: a existência de uma saturação magnética (que no caso do ferro é 2,15T) e a intensidade da corrente elétrica necessária para levar o material até o nível de indução magnética desejada. A polarização magnética de saturação é uma propriedade intrínseca, ou seja, não é afetada por defeitos microestruturais e depende, basicamente, da composição química. A adição de silício ao aço reduz a saturação do aço elétrico em 0,05T/%Si. A adição de cromo, como no inox 430, também reduz bastante a saturação magnética. Essa propriedade origina-se na estrutura eletrônica do ferro: o valor da saturação do ferro está diretamente ligado ao fato do ferro ter 7 ou 8 elétrons na camada 3d, ou seja, ter 2 ou 3 elétrons com spins desemparelhados. O silício é um elemento químico sem spins desemparelhados, portanto não magnético, que substitui os átomos de ferro na rede: com isso, a adição de silício tem um efeito exclusivamente diluidor da magnetização. A permeabilidade magnética é importante para aqueles que precisam atingir altos campos magnéticos no entreferro (geradores) ou aos fabricantes de máquinas de alto desempenho energético (transformadores e motores). A permeabilidade magnética está ligada às "perdas no cobre" das máquinas, ou seja, a dissipação de energia por efeito Joule associado à corrente elétrica necessária para a magnetização do material (ou seja, a corrente elétrica nos fios de cobre do estator) e para a criação do campo magnético no entreferro. É interessante notar que a intensidade da corrente dependerá da espessura das chapas que compõe o circuito magnético. Quanto mais fina a chapa, menor a corrente elétrica necessária para magnetizá-la, logo, menor serão as perdas no cobre. Essa é uma das principais razões de se utilizar chapas finas nos núcleos das máquinas elétricas.

Como a maioria das aplicações de aços elétricos se dá em máquinas excitadas em corrente alternada, surge um segundo parâmetro de seleção desses aços: as perdas magnéticas. Como a magnetização não é um fenômeno reversível, o processo cíclico de magnetizar e desmagnetizar a cada 1/120 de segundo leva à ocorrência de histerese. Devido à existência da histerese magnética e da circulação de correntes elétricas parasitas induzidas pela variação do fluxo magnético no interior do material, o processo de inversão da magnetização ocorre com dissipação de energia, ou seja, com “perdas magnéticas”, também conhecidas como “perdas no ferro”. Dada a importância do rendimento energético das máquinas, e como as perdas no ferro costumam ser muito maiores que as perdas no cobre, as perdas magnéticas são o principal parâmetro técnico de seleção e controle dos aços elétricos.

2.3. Classificação Dos Aços Elétricos

Os aços elétricos dividem-se em duas famílias, os aços de grão orientado e os aços de grão não-orientado.

2.3.1 Aços De Grão Orientado (GO)

Este material foi desenvolvido pelo metalurgista americano Norman Goss em 1933. Ele descobriu que, com uma laminação a frio com um recozimento intermediário, acrescido de um recozimento final a alta temperatura, produz-se chapas com melhores propriedades magnéticas na direção de laminação, que as chapas com laminação a quente. Esta melhora é devido a uma textura magneticamente favorável, produzida por uma recristalização secundária, durante o recozimento a alta temperatura. Chapas com grãos orientados começaram a ser produzidas comercialmente por volta de 1945, e desde então, suas propriedades tem sido melhoradas continuamente. As chapas possuem 3% de silício e apresentam tipicamente uma espessura menor do que 0,35mm. Como naquela textura existe apenas uma direção <100> paralela à direção de laminação, as propriedades magnéticas são muito boas na direção de laminação e ruins nas outras direções, incluindo a direção transversal. Assim, o corte e a montagem das chapas em um transformador devem ser projetados para que o fluxo magnético seja conduzido paralelamente à direção de laminação das chapas.

2.3.2 Aços De Grão Não-Orientado (GNO)

Este tipo de aço foi desenvolvido pelo metalurgista inglês Robert Hadfield em 1900 e logo se tornou o material mais utilizado para construção de núcleo de motores e geradores. A adição de silício ao ferro, modifica profundamente as mudanças de fase, uma vez que o conteúdo de carbono é muito pequeno. Atualmente estas ligas são conhecidas como ferro-silício. A adição de silício ao ferro resulta em alguns efeitos sobre as propriedades físicas, entre os quais podemos destacar:

- A resistividade elétrica aumenta, causando uma redução nas correntes parasitas;
- A anisotropia cristalina diminui, causando um aumento na permeabilidade;
- Diminui a indução de saturação;

Os motores elétricos são máquinas em que o campo magnético é aplicado paralelamente à superfície da chapa, mas mudando continuamente de direção. Para esse tipo de aplicação, utilizam-se os "aços elétricos de grão não-orientado". A nomenclatura é errônea, pois na verdade esses aços também apresentam textura. Os últimos anos do século XX assistiram a importantes avanços no condicionamento da textura dos aços elétricos de grão não-orientado.

Aplicações que exigem isotropia de propriedades no plano da chapa utilizam-se aços de grão-não-orientado. A condição isotrópica é crítica para a aplicação em motores elétricos, que é de longe o principal segmento consumidor de aços elétricos, seguido pelo uso em pequenos transformadores. O tamanho de grão tem um efeito muito forte nas perdas magnéticas. Quanto maior o tamanho de grão, menor a parcela histerética das perdas, mas cresce a parcela chamada "anômala", fazendo com que exista um tamanho de grão ótimo, entre 100 e 150 μ m. A figura 1 ilustra o refinamento de grãos em um aço GNO.

a)



b)



Figura 1 - Comparação do aspecto dos grãos após recozimento final num aço semiprocessado **(a)** e num aço totalmente processado **(b)**. Espessura da chapa 0,5mm.

3. A Eficiência Energética e a Importância da Redução das Perdas Magnéticas

No Brasil, o racionamento de 2001 mostrou duramente que a energia (em especial, a que vem sob a forma de eletricidade) não é abundante e nem tem custo de oportunidade nulo, como têm mostrado os constantes aumentos de tarifa. O uso eficiente de energia está estritamente relacionado com a consecução de importantes objetivos mais abrangentes e de interesse da sociedade, como por exemplo:

- contribuir para aumentar a confiabilidade do sistema elétrico;
- reduzir ou postergar as necessidades de investimentos em geração, transmissão e distribuição;
- reduzir impactos ambientais (locais e globais) especialmente relacionados com a produção de eletricidade;
- reduzir custos de energia para o consumidor final.

Em termos de fontes de energia, a participação relativa para o consumo da indústria, a eletricidade é a principal fonte, com 1/5 de contribuição, seguida do bagaço de cana. Estima-se que motores elétricos na indústria brasileira consumam 82.217 GWh/ano, que equivalem a 60% da eletricidade consumida no setor secundário e 27% do consumo brasileiro (vale lembrar que motores são usados também nos outros setores, o que eleva a sua participação). Pela enorme importância dos motores no consumo de energia elétrica, mesmo a redução de consumo de 1% (a ordem de grandeza da economia atual) representam a não entrada de usinas de mais de 230 MW – 4% equivaleriam a mais que uma turbina de Itaipu: Itaipu fornece 73 TWh, com 18 turbinas de capacidade total 12.600 MW, 18 x 700 MW (ONS, 2003), um fator de carga de 0,66. Nestas condições, 1.335 GWh (1% da energia usada nos motores) seriam atendidos por uma usina de 231 MW e 5.340 GWh (4%) por 924 MW. Vale observar que este cálculo envolve também os motores monofásicos, que ainda não foram regulamentados.

A necessidade de induzir a sociedade a reduzir o consumo de energia elétrica tem levado os governos de todo o mundo a pressionar os fabricantes de eletrodomésticos na direção do aumento do rendimento energético de seus motores. Um dos meios disponíveis para aumentar o rendimento energético dos motores é utilizar aços com menores perdas magnéticas. Um motor de geladeira tem, tipicamente, potência nominal de 150W e utiliza 3kg de aço, ou seja, tem potência de 50W/kg. Se a indução magnética média no interior do seu circuito magnético for da ordem de 1,5T, as perdas magnéticas consumiriam 36% da potência, se fosse usado um aço ABNT 1006 sem recozimento, ou apenas 8% da potência se usar um aço de "alta eficiência". Assim, o mercado pode mudar significativamente, dependendo até da legislação ligada ao consumo energético dos produtos que o utilizam. Os aços elétricos têm um papel muito importante na matriz energética do país e do planeta, pois aproximadamente 50% da energia elétrica produzida anualmente é utilizada por motores de tração. Parte dessa energia elétrica é dissipada como "perdas elétricas". Devido à importância do rendimento dos motores o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) fez aprovar o Decreto 4.508/2002, que regulamentou a eficiência energética dos “motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo” (BRASIL, 2002, p. 1), que correspondem a 75% dos motores instalados no país. A tabela 1 mostra os rendimentos nominais mínimos exigidos por lei para motores do tipo padrão e do tipo alto rendimento:

Tabela 1 – Rendimentos pela Lei da Eficiência Energética

Potência nominal		Padrão				Alto Rendimento			
cv	kW	P2	P4	P6	P8	AR2	AR4	AR6	AR8
1	0,75	72,7	76,0	72,5	65,1	80,9	80,6	79,4	75,0
1,5	1,1	75,7	72,7	73,2	67,7	83,1	79,5	79,2	80,5
2	1,5	76,1	77,6	73,5	74,7	84,3	84,0	84,0	84,1
3	2,2	81,5	79,3	76,6	78,1	85,1	84,8	84,7	86,2
4	3	84,0	82,7	79,4	81,3	86,5	86,2	87,0	86,5
5	3,7	83,2	84,6	82,5	82,7	87,5	88,0	87,5	86,2
6	4,5	84,3	84,2	84,0	83,6	87,5	88,0	88,2	88,1
7,5	5,5	85,2	88,0	84,4	84,5	88,7	90,0	89,3	89,7
10	7,5	86,5	85,2	85,8	83,8	90,2	91,5	90,1	88,7
12,5	9,2	87,5	87,7	87,3	86,6	90,5	90,9	90,5	91,0
15	11	89,4	88,3	88,3	87,3	91,0	91,7	90,2	91,4
20	15	91,0	89,8	89,0	87,4	93,0	92,4	90,6	91,9
25	18,5	90,5	90,1	89,4	88,8	93,0	92,6	92,1	92,7
30	22	91,0	91,0	90,2	89,4	93,0	93,0	93,2	93,0
40	30	91,0	91,0	90,6	90,9	93,1	93,0	93,3	93,0
50	37	92,2	91,7	91,2	91,0	93,2	93,0	93,2	93,6
60	45	91,0	91,7	91,7	91,7	93,4	93,6	93,6	94,1

Potência nominal		Padrão				Alto Rendimento			
cv	kW	P2	P4	P6	P8	AR2	AR4	AR6	AR8
75	55	92,5	91,9	92,1	92,7	93,4	93,8	94,0	94,4
100	75	93,1	92,5	92,7	92,6	93,9	94,3	94,6	94,5
125	90	91,4	91,8	92,9	92,6	94,5	94,4	94,6	95,2
150	110	92,7	92,0	93,0	92,8	94,5	95,0	94,7	95,4
175	132	92,9	92,7	93,7		95,0	95,1	95,3	
200	150	93,3	93,4	93,7		95,0	95,3	95,4	
250	185	92,5	93,5			95,4	95,0		

Fonte: Decreto 4.508 (BRASIL, 2002).

As colunas na tabela 1 significam:

cv e kW	Potência nominal (mecânica, em ambos os casos) dos motores considerados
P2, P4, P6 e P8	Motores padrão com, respectivamente, 2, 4, 6 e 8 pólos
AR2, AR4, AR6 e AR8	Motores de alto rendimento com, respectivamente, 2, 4, 6 e 8 pólos

4. Fundamentação Teórica Sobre as Perdas Magnéticas

4.1. Considerações Gerais

Quando uma determinada densidade de fluxo magnético ‘B’ varia com o tempo e atravessa uma lâmina de material ferromagnético, irão surgir correntes que circulam em planos perpendiculares à direção do campo aplicado neste material. Estas correntes são denominadas “correntes parasitas” ou “correntes de Foucault”.

Simultaneamente ao fenômeno das correntes parasitas, produz-se um outro conhecido como histerese. Este fenômeno é decorrente do fato de que os domínios do metal apresentam uma certa constante de tempo antes de se orientarem com o campo aplicado, exibindo um atraso entre a aplicação do campo e o aparecimento da indução.

Teoricamente, as perdas, traduzidas em forma de calor, são atribuídas aos fenômenos da histerese e das correntes parasitas. As perdas totais seriam então o resultado do somatório dessas duas componentes, porém é comprovado experimentalmente que as perdas totais são maiores que o somatório das perdas histeréticas e parasíticas clássicas. A esta parcela incremental das perdas totais é dado o nome de “perdas anômalas” ou “perdas em excesso”.

4.2. Perdas Parasíticas Clássicas

Uma vez estabelecidas as correntes induzidas pela variação da densidade de fluxo que atravessa o material, anéis de corrente se formarão no mesmo. A figura 2 ilustra o fenômeno.

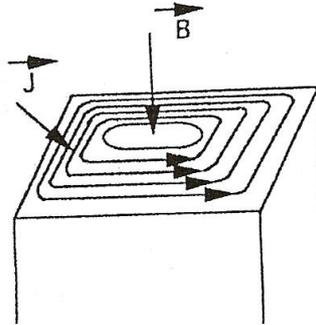


Figura 2 – Correntes parasitas em uma seção reta de uma lâmina de material ferromagnético.

A figura 2 ilustra o fato de que a densidade de corrente é máxima na superfície externa e nula no centro da lâmina. Este fenômeno é conhecido como “efeito pelicular” e agrava o problema de perda de energia, pois há redução na área de seção reta efetiva do material.

A equação 4.1, desenvolvida teoricamente, permite calcular o valor das perdas parasitas:

$$P_p = \frac{(\pi * B * f * e)^2}{6 * d * \rho} \quad (4.1)$$

onde P_p , perdas parasitas, será dado em W/Kg quando

$B_{m\acute{a}x}$, indução máxima do ensaio, em T

e , espessura da lâmina, em m

f , frequência de ensaio, em Hz

ρ , resistividade elétrica, em $\Omega .m$

d , densidade, em Kg/m^3

Fazendo $Ke = e^2/(12d\rho)$ em 4.1, temos:

$$\frac{P_e}{f} = 19,7392 K_e B_m^2 f \quad (4.2)$$

A relação $\frac{P_e}{f}$ representa as perdas de energia em J/Kg.

Evidentemente que as estas correntes podemos associar as perdas por efeito Joule ($p = \rho \cdot I^2$, em W/m^3) que farão com que parte da energia injetada no sistema para criar a indução magnética no material seja transformada em calor.

À medida que B varia de modo cada vez mais lento, as correntes parasitas induzidas no material diminuem de intensidade. Quando estas correntes tornam-se desprezíveis, obtém-se um laço que corresponde à histerese pura (laço estático). Porém, em corrente alternada, o laço tende a tornar-se mais largo, devido às correntes parasitas (laço dinâmico). Isto pode ser explicado da seguinte maneira: as correntes parasitas produzem uma força magnetomotriz oposta àquela produzida pelo campo externo aplicado. Para que seja mantido o mesmo valor de B é necessário que o campo externo cresça.

4.3. Perdas Histeréticas

Quando um material ferromagnético é submetido à ação de um campo magnético H variável com o tempo numa frequência f ($f = 1/T$), ele percorrerá um ciclo de magnetização e desmagnetização, denominado ciclo de histerese. Para percorrer o ciclo de histerese, parte da energia injetada no material é consumida, isto se traduz no aquecimento do material e caracterizam as chamadas perdas por histerese. As perdas dependem do valor do campo magnético aplicado como ilustra a figura 3.

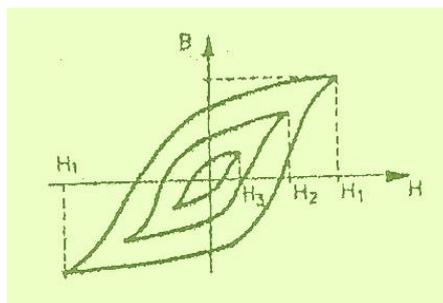


Figura 3 – Ciclo de histerese para diferentes valores de campo magnético aplicado.

Usando resultados experimentais Steinmetz chegou a uma expressão empírica que fornece a área do ciclo de histerese, conhecida como a equação de Steinmetz, dada em W/m³.

$$P_h = k_1 * B_m^{k_2} * f \quad (4.3)$$

onde k_1 e k_2 são constantes que dependem do tipo de material magnético.

4.4. Perdas Anômalas

As perdas anômalas, que são a parcela incremental das perdas totais quando subtraídas as perdas histeréticas e parasitas clássicas, apresentam maior taxa de crescimento entre 0 e 30 Hz, chegando a representar aproximadamente 50% das perdas totais (Sharp e Overshott, 1974).

Ainda não há uma explicação completa para a origem das perdas anômalas, entretanto, cita-se como uma das causas principais a magnetização não-uniforme nos grãos (Overshott, 1976).

A equação 4.4 (Fiorillo e Novikov, 1990), com base nos desenvolvimentos de Bertotti (1988), estabelece o cálculo das perdas anômalas, em J/Kg, considerando K_a como sendo o coeficiente de perdas anômalas:

$$\frac{p_a}{f} = 8,7634 K_a B_m^{3/2} f^{1/2} \quad (4.4)$$

4.5. Perdas Totais

As perdas totais, por ciclo, incluem as perdas histeréticas, as perdas parasíticas clássicas e as perdas anômalas. A equação 4.5 estabelece o cálculo das perdas totais, em J/Kg, com base nas equações 4.2, 4.3 e 4.4.

$$\frac{p_t}{f} = k_1 B_m^{k_2} + 19,7392 K_e B_m^2 f + 8,7634 K_a B_m^{3/2} f^{1/2} \quad (4.5)$$

Através de uma rotina de ajuste de curvas é possível determinar as constantes desta equação para determinado valor de Bm , separando-se os diferentes tipos de perdas.

5. Ensaio de Medição de Perdas em uma Liga Fe-Si de Grãos Orientados

5.1. Objetivo do Ensaio de Medição de Perdas

O objetivo deste ensaio é obter as perdas totais em Joules por quilograma de massa de ferro em uma faixa de frequência que varia de 4 a 120 Hertz para uma indução de pico de 1,5 T. De posse destas perdas é possível traçar a curva de perdas em função da frequência de ensaio e utilizando um software de ajuste de curvas podemos calcular os coeficientes da equação 4.5 e separar as perdas totais em suas três componentes. Uma das principais utilidades da separação de perdas é fornecer dados para poder discutir como reduzir as perdas nos aços, daí a relevância de tal procedimento.

5.2. Fundamentação Teórica

Quando uma tensão senoidal é aplicada ao enrolamento primário de um transformador podemos dizer que, de acordo com a lei de Faraday, a tensão em seus terminais será:

$$u_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ e } u_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \text{ se considerarmos que o mesmo fluxo atravessa os dois}$$

enrolamentos. Sabendo que o fluxo concatenado λ é igual a $N\phi$ e considerando que ambos os enrolamentos possuem o mesmo número de espiras, podemos escrever a equação dos terminais do transformador como sendo:

$$u(t) = \frac{d\lambda}{dt} \tag{5.1}$$

como $\lambda(t)$ é uma função senoidal podemos escrevê-la como:

$$\lambda(t) = \lambda_m \text{sen}(wt) \quad (5.2)$$

conseqüentemente teremos que:

$$u(t) = w\lambda_m \cos(wt) \quad (5.3)$$

o valor de pico de $u(t)$ ocorre quando $\cos(wt) = 1$, então podemos escrever:

$$U_m = w\lambda_m \quad (5.4)$$

sabendo o valor de pico de $u(t)$ seu valor eficaz será:

$$u_e = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \lambda_m \quad (5.5)$$

sabendo que $\lambda_m = N\phi$ e $\phi = SB_m$, onde S é a área de seção reta transversal do material magnético e B_m é a indução de pico, podemos escrever a equação 5.5 como sendo:

$$u_e = 4,44 NSB_m f_e f \quad (5.6)$$

onde f_e é o fator de empilhamento das espiras enroladas no núcleo Fe-Si. Neste trabalho foi adotado um fator de empilhamento de 0,96.

Conhecendo o número de espiras dos enrolamentos e a área de seção reta transversal do material a ser estudado pode-se calcular a tensão necessária pra termos uma indução fixa de 1,5 T em toda a faixa de freqüências de interesse.

As perdas totais em Watts são encontradas através do cálculo do valor médio da potência dissipada pelo circuito magnético:

$$p(t) = \frac{1}{T} \int [v(t)i(t)]d(t) \quad (5.7)$$

onde $v(t)$ é a tensão no secundário do transformador e $i(t)$ é a corrente que circula pelo circuito.

5.3. Características Construtivas do Transformador Sob Ensaio

Como o objetivo do ensaio é obter as perdas em Joules por quilograma precisamos calcular a massa da liga Fe-Si e dividir as perdas por esta massa. A massa da liga é calculada a partir de suas características construtivas.

$$m = \rho V \quad (5.8)$$

A figura 4 ilustra o transformador submetido a ensaio de medição de perdas:



Figura 4 – Transformador em forma de toroide composto por uma liga Fe-Si de grãos orientados no núcleo e fios geminados formando os enrolamentos ($n = 1:1$).

5.3.1. Característica dos Enrolamentos

- Enrolamentos compostos por cabos geminados
- Relação de transformação 1:1
- Número de espiras – $N = 30$

5.3.2. Características do Núcleo

- Liga Fe-Si de grãos orientados
- Área de seção reta transversal – $S = 7,2 \text{ cm}^2$
- Comprimento médio – $\ell = (\pi * 8) \text{ cm}$

- Resistividade do ferro - $\rho = 7,88 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

A partir destas características podemos calcular o volume e a massa do material:

$$\begin{aligned}
 V &= S * \ell & (5.9) \\
 V &= 7,2 * 8 * \pi \text{ cm}^3 \\
 V &= 180,95 * 10^{-6} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

e de acordo com a equação 5.8 a massa do material é:

$$\begin{aligned}
 m &= \rho V \\
 m &= 7,88 * 10^3 * 180,95 * 10^{-6} \\
 m &= 1,42 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

5.4. Descrição do Experimento

Sabe-se que precisamos obter o sinal de tensão do secundário do transformador e o sinal da corrente que circula pelo circuito para podemos medir as perdas totais. A medição é feita pelo cálculo do valor médio da potência dissipada pelo circuito magnético (vide eq. 5.7). Através da equação 5.6 podemos ajustar o valor da tensão necessária para manter a indução em 1,5 T na frequência de ensaio. A figura 5 ilustra o esquema utilizado para a medição das perdas.

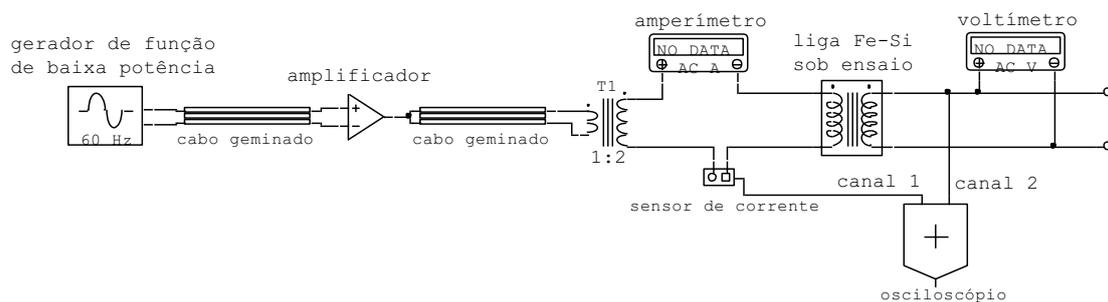


Figura 5 – Esquema do ensaio de medição de perdas

O gerador de funções utilizado no ensaio não tem potência o suficiente para excitar o núcleo do transformador, logo, é necessário um amplificador de sinais para elevar e ajustar os níveis de tensão de entrada. Um transformador elevador foi

utilizado para aumentar a tensão de entrada no primário da liga sob ensaio. O sensor de corrente fornece ao osciloscópio um sinal de tensão proporcional a corrente que circula pelo circuito na razão de 1:1, então, a forma de onda da corrente pode ser observada e medida no canal 1. Finalmente, no canal 2 do osciloscópio, temos a tensão no secundário do transformador que é calculada pela equação 5.6 e ajustada pelo ganho do amplificador. Conseqüentemente podemos obter o sinal da potência multiplicando os sinais de corrente $i(t)$ (canal 1) e tensão $v(t)$ (canal 2). Calculando o valor médio deste sinal de potência temos as perdas totais em Watts na freqüência de ensaio.

O osciloscópio da *Agilent Technologies DSO3000* utilizado no ensaio permite o cálculo da multiplicação de sinais através de sua função MATH. Ele também é capaz de calcular o valor médio de sinais a partir de sua função MEASURE. A Figura 6 ilustra o modelo utilizado no experimento.

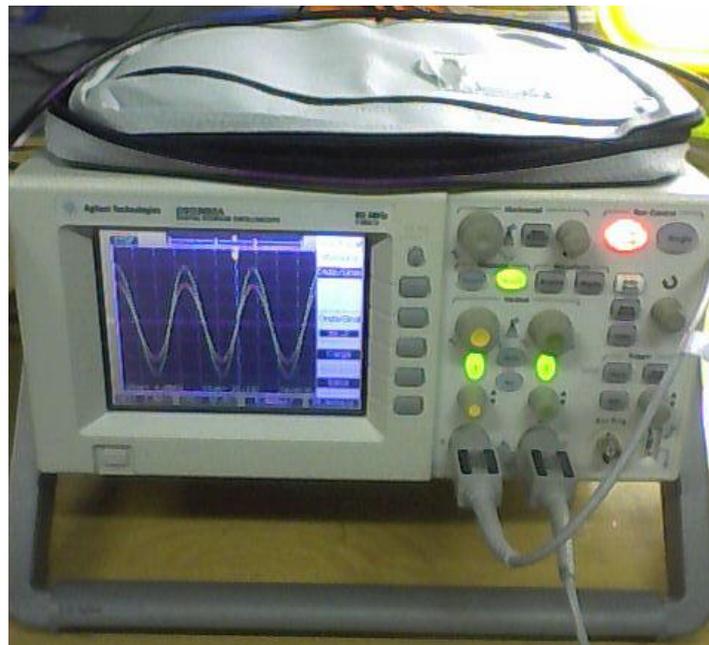


Figura 6 – Osciloscópio da Agilent Technologies utilizado no ensaio de medição de perdas

Com as perdas em Watts dadas pelo osciloscópio podemos calcular as perdas em J/Kg e traçar a curva de perdas em função da freqüência. Utilizando um software de ajuste de curvas podemos calcular os coeficientes da equação 4.5 e separar as perdas totais em suas componentes.

5.5. Medição e Separação das Perdas - Análise dos Resultados

A partir da equação 5.6 foi construída a tabela 2 e a partir dos dados coletados do osciloscópio a tabela foi devidamente preenchida. Sendo:

- U_e , a tensão eficaz no secundário para manter a indução em 1,5 T.
- f , a frequência de ensaio.
- P , as perdas totais em W/Kg, ou seja, o valor médio da potência dissipada fornecida pelo osciloscópio dividido pela massa da liga Fe-Si.
- P' , as perdas totais em J/Kg, ou seja, o valor das perdas em W/Kg dividido pela frequência de ensaio correspondente.

Tabela 2

Perdas magnéticas associadas à frequência de ensaio para uma indução de 1,5 T.

$U_e(V)$	$f(Hz)$	$P(W/Kg)$	$P'(J/Kg)$
0,138	1		
0,276	2		
0,552	4	0,015	0,0038
0,829	6	0,029	0,0048
1,105	8	0,055	0,0069
1,381	10	0,068	0,0068
1,657	12	0,100	0,0083
1,933	14	0,120	0,0086
2,210	16	0,150	0,0094
2,486	18	0,160	0,0089
2,762	20	0,190	0,0095
3,038	22	0,240	0,0109
3,314	24	0,270	0,0113
3,591	26	0,290	0,0112
3,867	28	0,330	0,0118
4,143	30	0,360	0,0120
4,834	35	0,450	0,0129
5,524	40	0,560	0,0140
6,215	45	0,680	0,0151
6,905	50	0,780	0,0156
7,596	55	0,870	0,0158
8,286	60	1,050	0,0175
8,977	65	1,200	0,0185
9,667	70	1,320	0,0189
10,358	75	1,500	0,0200
11,048	80	1,670	0,0209
11,739	85	1,830	0,0215

12,429	90	2,014	0,0224
13,120	95	2,190	0,0231
13,810	100	2,400	0,0240
14,501	105	2,600	0,0248
15,191	110	2,720	0,0247
15,882	115	2,870	0,0250
16,572	120	3,060	0,0255

A figura 7 ilustra como foi feita a aquisição dos valores da potência em Watts através do osciloscópio e as formas de onda da tensão no secundário do transformador em estudo $v(t)$, corrente de magnetização $i(t)$ e potência dissipada pelo circuito magnético $p(t)$.

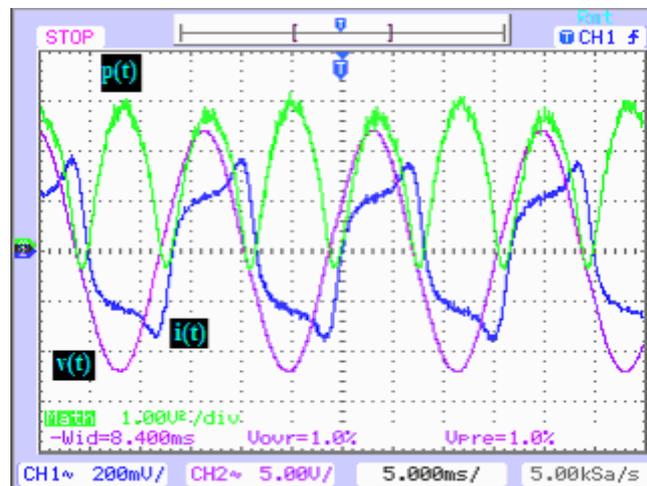


Figura 7 – tensão senoidal a 60Hz $v(t)$, corrente de magnetização $i(t)$ e potência dissipada $p(t)$ fornecidas pelo osciloscópio DSO3000 da Agilent Technologies.

Estas são as formas de onda à frequência de 60 Hz da tensão no secundário da amostra $v(t)$, corrente de magnetização do material $i(t)$ e potência dissipada $p(t)$. Através da função MEASURE do osciloscópio utilizado é possível obter o cálculo do valor médio da potência $p(t)$ e com isso obter as perdas totais em Watts.

As perdas em Watts foram medidas para uma faixa de frequência que varia de 4 a 120 Hz porque abaixo de 4 Hz a forma de onda dos sinais estava completamente distorcida inviabilizando qualquer tipo de medição que possa ser considerada satisfatória. A figura 8 ilustra a forma de onda dos sinais a 2 Hz.

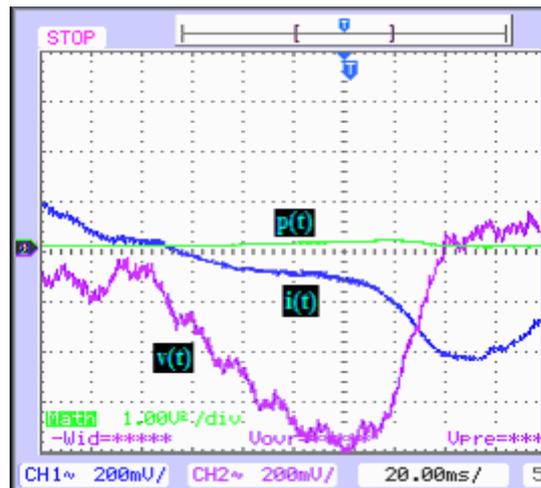


Figura 8 – formas de onda dos sinais de tensão, corrente e potência à frequência de 2 Hz.

Neste experimento notou-se que para as frequências abaixo de 40 Hz a forma de onda na tensão do secundário começa a distorcer gradativamente. A figura 9 ilustra a forma de distorção encontrada a 40 Hz.

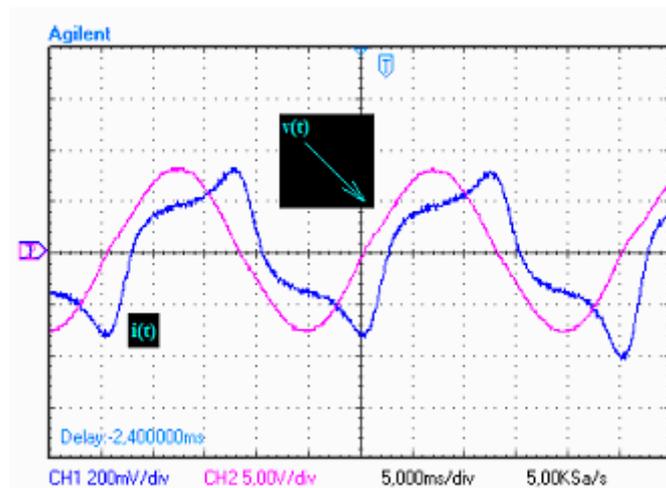


Figura 9 – distorção encontrada no sinal de tensão $v(t)$ a 40 Hz.

Com os valores das perdas em J/Kg foi traçada a curva de perdas em função da frequência de ensaio. A figura 10 mostra o gráfico das perdas em J/Kg em função da frequência de ensaio.

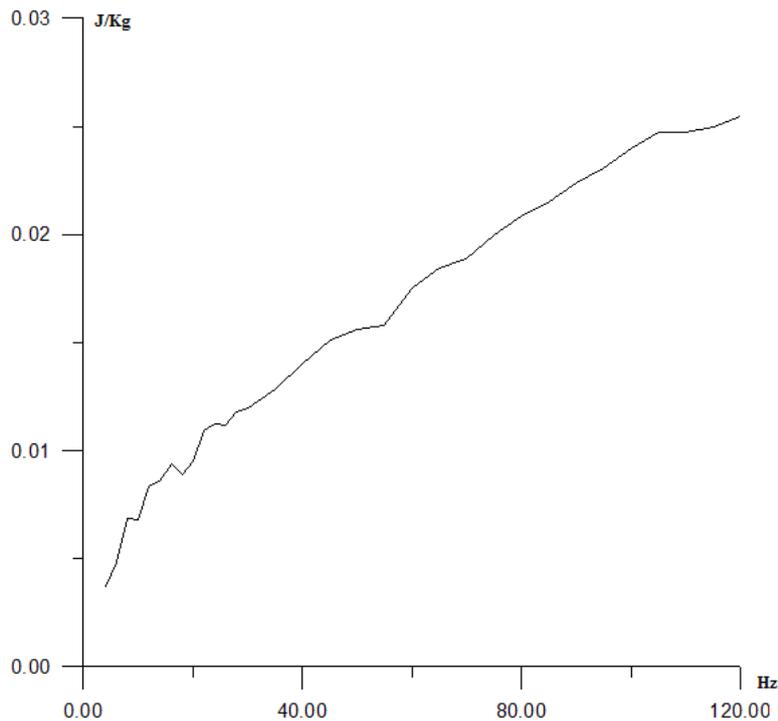


Figura 10 – Perdas Totais (em J/Kg) vs Frequência de ensaio (em Hz)

Com o software de ajuste de curvas *LabFit* foi realizado o ajuste da curva. A separação das perdas foi feita da seguinte forma:

a partir da equação 4.5

$$\frac{p_t}{f} = k_1 B_m^{k_2} + 19,7392 K_e B_m^2 f + 8,7634 K_a B_m^{3/2} f^{1/2}$$

podemos reescrever os coeficientes de forma a obter uma equação da forma

$$\frac{p_t}{f} = A + Bf + Cf^{1/2} \tag{5.10}$$

a partir dos valores dos coeficientes da equação 5.10, fornecido pela ferramenta de ajuste de curvas, é possível calcular os coeficientes da equação 4.5 e com isso separar as perdas totais em suas componentes. A figura 11 mostra o ajuste da curva de perdas magnéticas em função da frequência de ensaio e o valor dos coeficientes da equação 5.10.

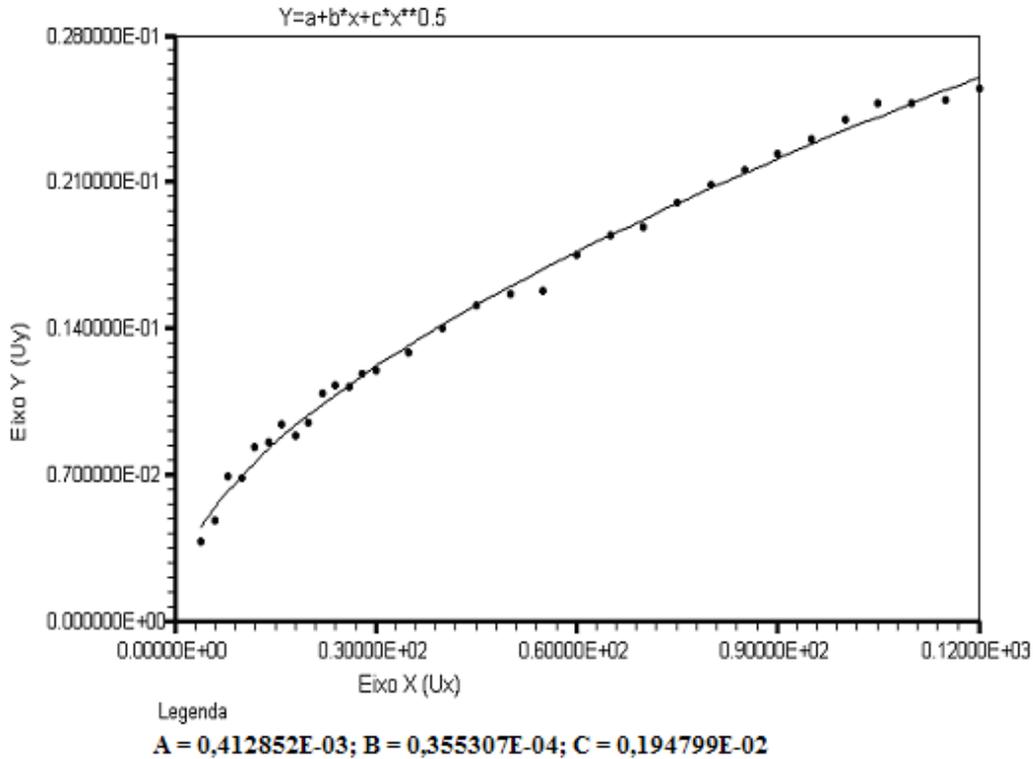


Figura 11 – Ajuste da curva de perdas e coeficientes da equação 5.10.

Com os valores dos coeficientes da equação 5.10 podemos encontrar os coeficientes da equação 4.5 e assim separar as perdas. Desta maneira as perdas histeréticas serão:

$A = k_1 B_m^{k_2}$, então, $k_1 B_m^{k_2} = 0,412852 * 10^{-3}$ que são as perdas histeréticas em J/Kg. As perdas histeréticas em W/Kg podem ser calculadas pela equação

$$P_h = 0,412852 * 10^{-3} f \quad (5.11)$$

As perdas parasíticas serão:

$B = 19,7392 K_e B_m^2 f$, logo, $K_e = \frac{0,355307 * 10^{-4}}{44,4132 f}$ e as perdas parasíticas, em J/Kg,

podem ser calculadas para toda a faixa de freqüências de interesse a partir da equação

$$\frac{P_e}{f} = 0,355307 * 10^{-4} f \quad (5.12)$$

As perdas parasíticas em W/Kg podem ser calculadas pela equação

$$P_e = 0,355307 * 10^{-4} f^2 \quad (5.13)$$

As perdas anômalas serão:

$$C = 8,7634 K_a B_m^{3/2} f^{1/2}, \text{ logo, } K_a = \frac{0,194799 * 10^{-2}}{16,1 f^{1/2}} \text{ e as perdas anômalas, em J/Kg,}$$

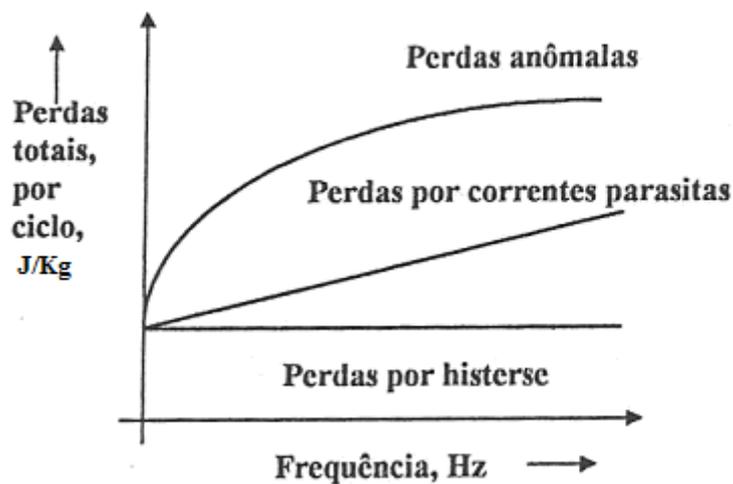
podem ser calculadas para toda a faixa de frequências de interesse a partir da equação

$$\frac{P_a}{f} = 0,194799 * 10^{-2} f^{1/2} \quad (5.14)$$

As perdas anômalas em W/Kg podem ser calculadas pela equação

$$P_a = 0,194799 * 10^{-2} f^{3/2} \quad (5.15)$$

Como mostram os valores encontrados para as perdas histeréticas, parasíticas e anômalas o resultado encontrado foi satisfatório e está de acordo com o esperado pela teoria. A figura 12 mostra o gráfico esperado das componentes das perdas totais em função da frequência de ensaio.



Figuras 12 – Componentes das perdas totais em função da frequência.

Com base nas equações 5.11, 5.13 e 5.15 foi montada a tabela 3 que mostra as perdas magnéticas separadas em toda a faixa de frequências de ensaio. Sendo:

- Ph, as perdas histeréticas em W/Kg.
- Pe, as perdas parasíticas em W/Kg.

- Pa, as perdas anômalas em W/Kg.
- Erro (%), o erro percentual das medidas devido ao ajuste da curva.

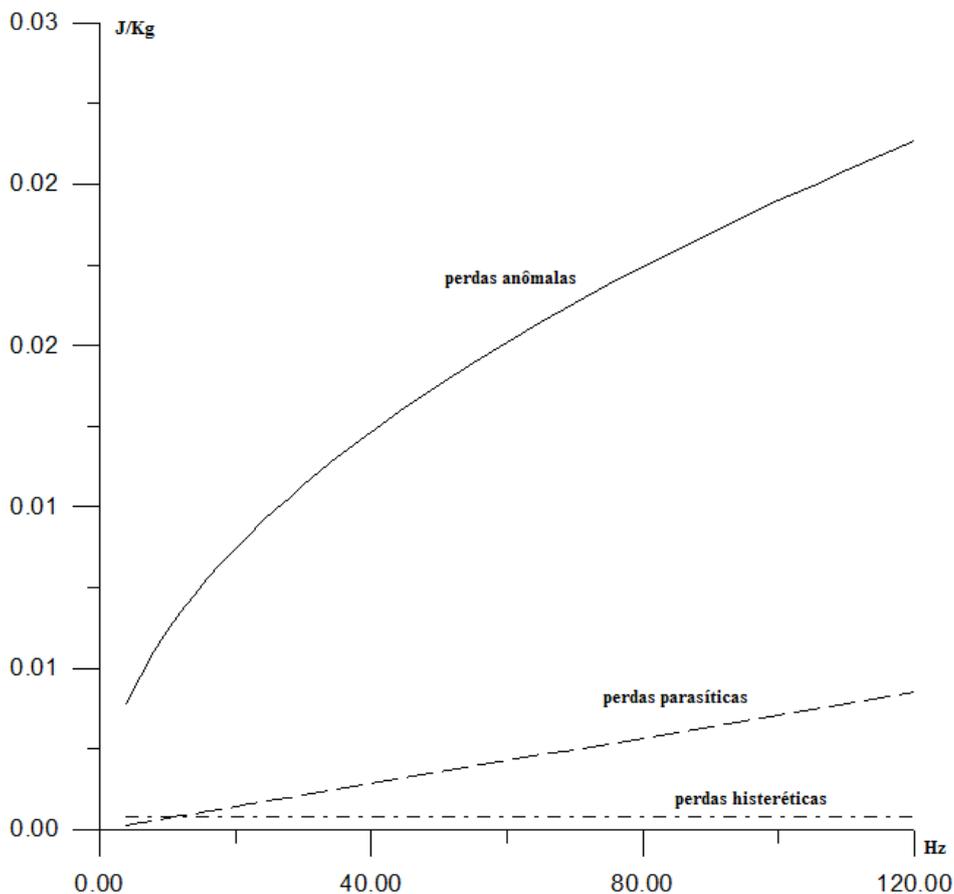
Tabela 3
Perdas totais e suas componentes em função da frequência de ensaio

Ue(V)	f(Hz)	P(W/Kg)	Ph(W/Kg)	Pe(W/Kg)	Pa(W/Kg)	Erro (%)
0,138	1					
0,276	2					
0,552	4	0,015	0,00165	0,00057	0,01558	15,75%
0,829	6	0,029	0,00248	0,00128	0,02863	10,45%
1,105	8	0,055	0,00330	0,00227	0,04408	10,76%
1,381	10	0,068	0,00413	0,00355	0,06160	1,85%
1,657	12	0,100	0,00495	0,00512	0,08098	9,83%
1,933	14	0,120	0,00578	0,00696	0,10204	4,54%
2,210	16	0,150	0,00661	0,00910	0,12467	6,86%
2,486	18	0,160	0,00743	0,01151	0,14876	4,60%
2,762	20	0,190	0,00826	0,01421	0,17423	3,41%
3,038	22	0,240	0,00908	0,01720	0,20101	5,59%
3,314	24	0,270	0,00991	0,02047	0,22904	4,08%
3,591	26	0,290	0,01073	0,02402	0,25825	1,03%
3,867	28	0,330	0,01156	0,02786	0,28862	0,60%
4,143	30	0,360	0,01239	0,03198	0,32009	1,22%
4,834	35	0,450	0,01445	0,04353	0,40336	2,46%
5,524	40	0,560	0,01651	0,05685	0,49281	1,09%
6,215	45	0,680	0,01858	0,07195	0,58804	0,21%
6,905	50	0,780	0,02064	0,08883	0,68872	2,28%
7,596	55	0,870	0,02271	0,10748	0,79457	5,92%
8,286	60	1,050	0,02477	0,12791	0,90534	0,76%
8,977	65	1,200	0,02684	0,15012	1,02084	0,18%
9,667	70	1,320	0,02890	0,17410	1,14086	1,78%
10,358	75	1,500	0,03096	0,19986	1,26526	0,26%
11,048	80	1,670	0,03303	0,22740	1,39387	0,95%
11,739	85	1,830	0,03509	0,25671	1,52656	0,64%
12,429	90	2,014	0,03716	0,28780	1,66322	1,30%
13,120	95	2,190	0,03922	0,32066	1,80373	1,22%
13,810	100	2,400	0,04129	0,35531	1,94799	2,36%
14,501	105	2,600	0,04335	0,39173	2,09590	2,73%
15,191	110	2,720	0,04541	0,42992	2,24738	0,10%
15,882	115	2,870	0,04748	0,46989	2,40233	1,70%
16,572	120	3,060	0,04954	0,51164	2,56070	1,98%

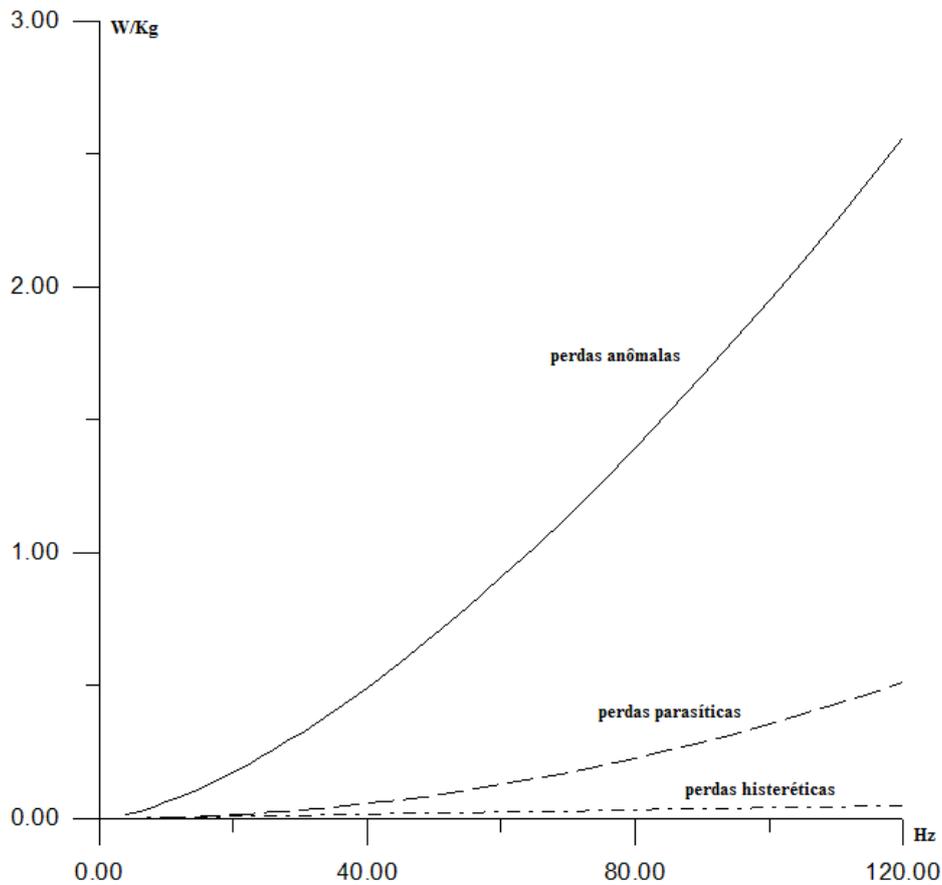
É notável que a precisão das medidas têm um erro apreciável. Isto decorre de uma série de fatores, tais como:

- Precisão dos instrumentos utilizados para o condicionamento e aquisição dos sinais: sensor de corrente e osciloscópio.
- Ruídos de altas frequências que se somaram aos sinais durante as medições e alteraram o valor médio da potência medida.
- Distorções na forma de onda do sinal de tensão aplicado ao primário do transformador ensaiado devido ao sistema utilizado (gerador de sinais + amplificador + transformador elevador). Estas distorções ficam mais evidentes à medida que se baixa a frequência de ensaio, conseqüentemente, os maiores erros são encontrados nas baixas frequências.

Com o auxílio do software *Grapher* e a partir dos dados da tabela 3 foi traçado o gráfico dos diferentes tipos de perdas em função da frequência de ensaio em J/Kg e em W/Kg. As figuras 13 e 14 mostram os respectivos gráficos.



Figuras 13 – Componentes das perdas totais, em J/Kg, em função da frequência.



Figuras 14 – Componentes das perdas totais, em W/Kg, em função da frequência.

Os gráficos plotados a partir dos dados da tabela 3 estão de acordo com o esperado, o que mostra que a medição e separação das perdas magnéticas da liga Fe-Si estudada ocorreu de forma satisfatória e de acordo com a fundamentação teórica apresentada neste trabalho.

6. Considerações Finais

O grande desafio do homem moderno é o de utilizar de forma mais eficiente os recursos energéticos disponíveis na natureza. Ligas amorfas e materiais nanocristalinos são alguns dos avanços na área dos materiais magnéticos que, além de outras características, possuem elevada permeabilidade magnética. De acordo com estudos realizados a melhoria do rendimento dos motores elétricos tem importância

estratégica na efficientização dos recursos energéticos do planeta e está diretamente ligada ao crescimento econômico dos países. É de fundamental importância o incentivo à pesquisa de novas tecnologias na área dos materiais magnéticos e da eletrônica de potência associada ao acionamento e controle de motores, bem como, a aplicação de políticas públicas mais efetivas na questão da eficiência energética.

Com relação à medição e separação das perdas magnéticas na liga Fe-Si submetida ao ensaio pode-se dizer que o resultado foi satisfatório e condiz com a teoria apresentada, porém algumas medidas podem ser tomadas para que as grandezas encontradas sejam mais precisas e os erros sejam minimizados: utilizar instrumentos de condicionamento e aquisição de sinais mais precisos para que as discrepâncias nas medidas sejam minimizadas, utilizar filtros para que ruídos de alta frequência não introduzam erros nas medições e utilizar geradores de sinais mais precisos e um amplificador de potência que forneça um sinal de excitação livre de distorções e que não precise de um transformador elevador para poder fornecer os níveis de tensão e corrente necessários para o material a ser ensaiado.

Este trabalho oferece um ferramental teórico à cerca dos aços elétricos e das perdas, bem como, um roteiro para se chegar às perdas magnéticas em transformadores de núcleo toroidal que são utilizados em aplicações especiais na engenharia devido, principalmente, ao seu alto rendimento. Espero que este trabalho sirva para ajudar outros colegas em seus estudos.

7. Referências Bibliográficas

1. GUERRA, F. C. F. (2007). Modelos de Transformadores de Corrente para Estudos em Baixas Frequências – Tese de Doutorado, COPELE/UFCG, Campina Grande – PB.
2. BERTOTTI, G. (1988). General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, IEEE Transactions on Magnetics, 24(1):621-630.

3. LUCIANO, B. A. (1999). Fundamentos de Circuitos Magnéticos e Transformadores, CCT/REECCT/PAPE, Campina Grande – PB
4. LANDGRAF, F. J. G. Materiais Magnéticos Para a Indústria Automobilística. Disponível em:
<http://www.aea.org.br/twiki/pub/AEA/PAPERS/PAP0051-18.09-14h30-Sala1.pdf>
Acesso em: 16/04/2009
5. LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. Disponível em:
<http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02Lan%20%20recope%20.pdf>
Acesso em: 16/04/2009
6. GARCIA, A. G. P. Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria [Rio de Janeiro] 2003. Disponível em:
<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/agpgarcia.pdf>
Acesso em: 16/04/2009
7. JANNUZZI, G. de M. Aumentando a Eficiência nos Usos Finais de Energia no Brasil. Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.
São Paulo – SP

7.1. Webliografia

http://pt.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7o-sil%C3%ADcio_de_gr%C3%A3o_orientado
Acessado em 17/04/2009

http://pt.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7o-sil%C3%ADcio_de_gr%C3%A3o_n%C3%A3o_orientado
Acessado em 17/04/2009