

Caracterização eletromagnética e térmica de uma nova liga de material ferromagnético de Cobalto-Vanádio-Ferro

Joaquim da Luz Lopes Ferreira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores: Prof. João Filipe Pereira Fernandes.
Prof. Paulo José da Costa Branco.

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel Gameiro de Castro.

Orientador: Prof. João Filipe Pereira Fernandes.

Vogais: Prof. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus.

Novembro de 2018

Declaro que o presente documento, é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e boas praticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Aos meus pais, Manuel Ferreira e Isabel Mateus, pelo grande apoio psicológico e financeiro prestado ao longo dos meus estudos, que culminam na conclusão desta tese. Agradeço também aos meus irmãos e cunhados que estiveram sempre dispostos a apoiar-me em toda esta fase e que foram um dos pilares da jornada da minha carreira académica que se revelou crucial para a elaboração desta dissertação.

À minha companheira Carina Ezequiel, por ter sido um apoio indefetível num dos momentos mais difíceis da minha vida e por revelar uma inesgotável paciência e compreensão, não só ao longo do processo da realização desta dissertação, mas também durante os anos em que frequentei o Instituto Superior Técnico. Sem esquecer o meu primogénito Bryan Ferreira, que, só de pensar nele, transmitiu-me pensamento positivo para atingir os meus objetivos e para que esse fosse concretizado.

E os meus sinceros reconhecimentos para com os meus orientadores, professor Paulo José da Costa Branco e ao professor João Filipe Pereira Fernandes. As suas concedidas ajudas, durante o desenrolar desta dissertação, foram determinantes para a conclusão deste projeto.

Agradeço também aos meus amigos e colegas por todo o apoio e carinho que recebi, pela força que sempre me transmitiram para elaborar este projeto e pela total compreensão da minha ausência em muitos dos eventos de confraternização que tiveram lugar durante este período.

Por fim, um enorme agradecimento a todos aqueles que não pude citar com especial carinho, mas que continuarão a ser a minha fonte de inspiração para o resto da minha vida.

Resumo

Este trabalho foca-se no estudo do comportamento eletromagnético e térmico de uma nova liga de material ferromagnético composta por Cobalto-Vanádio-Ferro, denominada por Hyperco50 (Hy50). Esta liga pertence à família dos materiais ferromagnéticos cujas propriedades variam devido às diferentes composições e através de tratamentos termomecânicos. Em geral, a nova liga Hy50, apresenta uma alta permeabilidade magnética e um ponto de saturação magnético superior aos dos materiais ferromagnéticos típicos usados em máquinas elétricas.

São desenvolvidos os modelos eletromagnético e térmico para um transformador monofásico com núcleo magnético da liga Hy50. O objetivo da construção deste transformador é o estudo do impacto no rendimento elétrico e na potência específica da aplicação do material Hy50. Os parâmetros característicos dos modelos foram ajustados aos resultados experimentais. Estes modelos foram validados através da comparação dos seus resultados com os de ferramentas de elementos finitos e, através de uma ferramenta numérica, foram calculados os pontos de funcionamento do transformador com a nova liga Hy50.

Foram realizados ensaios experimentais e simulações em elementos finitos para comparar os resultados do transformador composto por duas diferentes ligas: liga de Hy50 e a liga típica de ferro silício (Fe-Si). As curvas de magnetização foram obtidas para o material Hy50 impondo no seu núcleo campos magnéticos sinusoidais e, também, impulsos.

As ligas de Hy50 podem ser processadas para melhorar as suas propriedades magnéticas, possibilitando assim a sua utilização em aplicações de conversão de energia de alto desempenho. Exemplos destas aplicações são as máquinas elétricas de alta potência integradas nos setores de transporte, indústria, aeroespacial, entre outras. Estas propriedades magnéticas são, no entanto, desenvolvidas à custa da sua resistência mecânica.

Palavras Chave:

Desempenho; Curva BH; Perdas no ferro.

Abstract

This dissertation work studies the electromagnetic and thermal behaviors of a new magnetic iron-alloy named Hyperco50 (Hy50), from family of ferromagnetic materials, whose properties can vary magnetically between soft and hard materials, with the change of composition or thermal and mechanical treatments. In general, this new alloy, Hy50, presents high magnetic permeability and high saturation point which allows the design of smaller and more efficient components.

In this thesis are developed the electromagnetic and thermal models for a transformer made of Hy50 material. With these models, computational simulations were done to analyze the impact of using the new Hy50 alloy in the electrical efficiency and specific power of the transformer. The characteristic parameters of the models were adjusted to the experimental results. These models were validated by comparing its results with a Finite Element Analysis tool and, by using a numerical tool, the working points of the new transformer with Hy50 were calculated.

In all experimental tests and simulations, results of two magnetic alloys were analyzed: the new alloy Hy50 and the typical iron-silicon alloy (Fe-Si). The magnetization curves were obtained by exposing variable magnetic fields and magnetic pulses.

The Hy50 alloy can be processed to have adequate magnetic properties, which are important for high performance power generation applications, such as electrical machines in transportation, industry, aerospace, and other industries. These magnetic properties are, however, developed at the expense of mechanical strength and toughness, that need a special attention.

Keywords:

Performance; BH curve; Iron losses.

Conteúdo

Conteúdo	ix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do Trabalho	2
2. Estado da Arte	3
2.1. Materiais Ferromagnéticos em Máquinas Elétricas	3
2.2. Principais limitações Ferromagnéticas devido as Perdas no Núcleo	6
2.3. Perdas devido às Correntes Turbilhonares	6
2.3.1. Perdas de Histereses	7
2.3.2. Saturação Magnética	7
2.4. Estudos de Novos Materiais Supercondutores e Compósitos Magnéticos Hy50	10
2.4.1. Supercondutividade	10
2.4.2. Hyperco50	13
3. Características Eletromagnética e Térmica da Liga de Hyperco50	17
3.1. Características Eletromagnéticas	17
3.1.1. Metodologia para Obtenção da Curva BH Dos Materiais	17
3.1.2. Metodologia para Estimativa das Perdas no Núcleo	22
3.1.3. Ensaio Experimentais Para Determinação da Curva BH	22
3.1.4. Ensaio Experimentais para Determinação das Perdas no Núcleo Magnético ...	28
3.1.5. Comparação das Propriedades Magnéticas entre os Materiais	33
3.2. Modelo Térmico em Parâmetros Concentrados	34
3.3. Simulação em Elementos Finitos	37
4. Pré-Dimensionamento de um Transformador com liga de Hy50	39
4.1. Circuito Elétrico Equivalente do Transformador Monofásico	39
4.2. Cálculo dos Coeficiente de Indução	41
4.3. Desenvolvimento do Modelo em Simulink	43
4.4. Resultados de Simulação	47
4.4.1. Limitação à Temperatura	47
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	49

5.1. Conclusões	49
5.2. Trabalho Futuro	50
Referências.....	51

Lista de Figuras

Fig-2.1: Os pontos de operação da máquina na curva de magnetização inicial... 4	4
Fig-2.2: Efeito de percentagem de silício e da temperatura no comportamento dúctil e frágil das ligas Fe-Si. 5	5
Fig-2.3: a) Protótipo atual do um motor esférico utilizando Somaloy; b) Estator do motor construído utilizando o material Somaloy. 6	6
Fig-2.4: a) - Correntes parasitas no núcleo de ferro maciço; b) - Laminas de ferro isoladas entre si. 7	7
Fig-2.5: Os pontos de operação da máquina na curva de magnetização inicial. 8	8
Fig-2.6: a) perdas no ferro a 50 Hz e b) perdas no ferro a 400 Hz [34]. 8	8
Fig-2.7: A influência do coroamento na curva BH de magnetização do Co-Fe e Ni-Fe. 10	10
Fig-2. 8: Processo PIT [43]. 11	11
Fig-2.9: Esquema estrutural da fita 2G HTS [43]. 12	12
Fig-2.10: Material HTS atualmente usado em trabalhos científicos:(a) GdBCO e (b) YBCO. . 12	12
Fig-2. 11: Comparação da curva BH para diferentes condições de laminação de corte: ST, STfA, AfST, EDM, ED, EDfA, AfED [1]. 14	14
Fig-2. 12: a) 60 Hz e b) 400 Hz. (B variando de 0,5T a 2T) para laminados de anel em liga Hy50 estampado e cortado por fio: STfA, AfST, EDfA, AfED. [50]. 15	15
Fig-2. 13- Micrografias da borda de corte de HYPERCO 50: (a) ST, (b) STfA, (c) AfST, (d) ED, (e) EDfA, e (f) AfED. 56	56
Fig.3. 1: a) - Formato da liga Fe-Si “E” e “I” separados, mas a Bobine. b) - Formato da liga Hy50 “E” e “I” separados, mas a Bobine. 18	18
Fig.3. 2: a) - Protótipo desenvolvido para medição da curva B-H da liga Hy50 e Fe-Si, b) - Dimensões do protótipo desenvolvidos do núcleo formado por “E” e “I” 18	18
Fig.3. 3: Montagem do circuito magnético completo com sonda de efeito de Hall para medição do campo magnético em ensaio em Vazio. 19	19
Fig.3. 4: Transformador desenvolvido para a realização dos ensaios: à esquerda feito de Fe-Si e à direita de Hy50. 19	19
Fig.3. 5: a) - Circuito magnético EE 2D; b) - Circuito magnético EE 3D 20	20
Fig.3. 6: Ilustração do fluxo no interior do núcleo. 21	21
Fig.3. 7: a) - Circuito para aplicação uma tensão alternada sinusoidal, b) - circuito para aplicação de impulsos de tensão e c) - impulso de corrente gerado pelo circuito em b). 23	23
Fig.3. 8: Curva BH do Ferro Silício e Hy50 24	24
Fig.3. 9: Curva BH da região positiva do Fe-Si e Hy50. 25	25
Fig.3. 10: Parâmetros de recozimento antes e depois da laminação a frio, sendo esta figura adaptada de acordo com o da referência [56]. 26	26
Fig.3. 11: a) - curva de Histereses e b) - da permeabilidade da liga de Hyperco50. 26	26
Fig.3. 12: Perdas no núcleo de valores de frequências do Hy50: a) - 50, 100, 200 e 300 Hz; b) - 50, 400, 500 e 700 e 1K Hz. 27	27
Fig.3. 13: Evolução das perdas no ferro em função da corrente do Fe-Si e o Hy50. 29	29
Fig.3. 14: Evolução da Tensão em função da Corrente do Fe-Si e o Hy50. 30	30
Fig.3. 15: Evolução das perdas totais em função da corrente do Fe-Si e o Hy50. 30	30
Fig.3. 16: Transformador de maior dimensão do núcleo do Fe-Si. 30	30
Fig.3. 17: Curva de Tensão e Corrente do Material Ferro Silício. 31	31
Fig.3. 18: a) - Curva de Histereses; b) - Comparação experimentais com resultado do teórico de catálogo. 31	31

Fig.3. 19: Curva de Hysteresis por obtensao do fluxo e corrente	32
Fig.3. 20: Curvas B-H utilizadas na simulaçao dos materiais.	33
Fig.3. 21: a) - Circuito magnético; b) - Aproximaçao do circuito magnético a um cilindro....	36
Fig.3. 22: Circuito equivalente térmico	36
Fig.3. 23: Temperatura do Ferro Silício obtido experimentalmente	37
Fig.3. 24: Temperatura no a) Ferro Silício e b) Hyperco.	38
Fig-4. 1: Circuito equivalente do transformador.....	39
Fig-4. 2: Circuito monofasico do transformador	40
Fig-4. 3: a) Circuito 3D do COMSOL, b) Circuito 3D do COMSOL com a mesh.....	41
Fig-4. 4 : a) Fluxo total em uma seçao média da bobina superior e inferior nos circuitos Fe-Si e Hy50.	42
Fig-4. 5 : Coeficiente mútua e dispersao do circuito em Fe-Si e Hy50.....	42
Fig-4. 6 : Bloco contendo as equaçoes em (4.5).	43
Fig-4. 7 : Bloco contendo as equaçoes em (4.6).....	43
Fig-4. 8 : Bloco contendo as equaçoes em (4.7).....	44
Fig-4. 9 : Bloco contendo as equaçoes em (4.8).....	44
Fig-4. 10 : Bloco contendo as equaçoes em (4.9).....	44
Fig-4. 11: Modelo do transformador monofásico sem perdas.	45
Fig-4. 12: Esquema equivalente do transformador monofásico sem perdas	45
Fig-4. 13: Esquema equivalente do transformador monofásico com perdas.....	46
Fig-4. 14: Modelo do transformador monofásico com perdas.	47
Fig-4. 15: Rendimento do a) Fe Si e b) Hy50	58
Fig-4. 16:-Potência de entrada no a) Fe Si e b) Hy50.....	58
Fig-4. 17: Potência de saída: a) Fe Si e b) Hy50.....	59
Fig-4. 18: Perdas no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50	59
Fig-4. 19: Perdas no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50	60
Fig-4. 20: Perdas no Ferro: a) Fe Si e b) Hy50	60
Fig-4. 21: Temperatura no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50	61
Fig-4. 22:Corrente eficaz na linha 1: a) Fe Si e b) Hy50.....	61
Fig-4. 23: Corrente eficaz na linha 2: a) Fe Si e b) Hy50.....	62
Fig-4. 24: Tensão eficaz no secundário 2: a) Fe Si e b) Hy50.....	62
Fig-4. 25: Indução magnética B: a) Fe Si e b) Hy50	63
Fig-4. 26:-Indutância Mútua L_m : a) Fe Si e b) Hy50	63
Fig-4. 27: Rendimento do a) Fe Si e b) Hy50	64
Fig-4. 28: Potência de entrada no a) Fe Si e b) Hy50	64
Fig-4. 29: Potencia de Saída: a) Fe Si e b) Hy50.....	65
Fig-4. 30: Perdas no cobre: a) Fe Si e b) Hy50.....	65
Fig-4. 31: Perdas no Ferro: a) Fe Si e b) Hy50	66
Fig-4. 32: Temperatura no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50	66
Fig-4. 33: Corrente eficaz na linha 1: a) Fe Si e b) Hy50	67
Fig-4. 34: Corrente eficaz na linha 2: a) Fe Si e b) Hy50	67
Fig-4. 35: Tensão eficaz no secundário 2: a) Fe Si e b) Hy50.....	68
Fig-4. 36: induçao magnética B: a) Fe Si e b) Hy50.....	68
Fig-4. 37:Indutância Mútua L_m : a) Fe Si e b) Hy50.....	69

Lista de Tabelas

Tabela 3. 1: Resultado do ensaio com impulsos	24
Tabela 3.2: Resultados do ensaio em regime AC do Fe-Si.	28
Tabela 3.3: Resultados do ensaio em regime AC do Hy50.....	29
Tabela 3. 4: Resultados Experimentais de ensaio em regime AC.	32
Tabela 3. 5: Resultados de Catálogo.	33
Tabela 3. 6: Resultado entre o FS e HY	33
Tabela 3. 7: Resultados Preliminares	34
Tabela 3. 8: Resultado da resistência de condução	36
Tabela 3. 9: Resultado térmicos do MTPC	37
Tabela 3. 10: Comparação do resultado térmicos de simulação	38
Tabela 4. 1: Resultados de comparação, limitados na temperatura e no ponto de saturação do joelho, entre o Fe-Si e o Hy50.....	48

Lista de Acrónimos

AC	Regime alternado sinusoidal
AfST	Estampagem com Recozimento seguido de corte
AfED	Usinagem por descargas elétricas com recozimento seguido de corte
BSCCO	Óxido de cobre e cálcio de bismuto estrôncio
Co-Fe	Cobalto ferro
DC	Regime de corrente continua
EDM	Usinagem por descargas elétricas
ED	Usinagem por descargas elétricas com Corte não recozido
EDfA	Usinagem por descargas elétricas com corte seguido de recozimento
Fe-Am	Ferro amorfo
Fe-Si	Ferro silício
Hy50	Hyperco 50
MCs	Compósitos magnéticos
MTPC	Modelo térmico em parâmetros concentrados
Ni-Fe	Níquel Ferro
PIT	Pó no tubo
PF	Ponto de funcionamento
SMC	Compósitos Magnéticos Macios
SATC	Materiais supercondutores de alta temperatura crítica
STfA	Estampagem com Corte seguido de Recozimento
ST	Estampagem com corte não recozido.
YBCO	Óxido de cobre de ítrio
HTS	Alta Temperatura dos Supercondutor

Lista de Símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>unidade</i>
B	Campo indução magnética	T
D	Diâmetro	m
Gr	Número de Grashof	
f	Frequência elétrica	Hz
h	Coefficiente de convecção	W/(m ² K)
H	Intensidade de campo magnético	A/m
\bar{H}	Fasor da Intensidade de campo magnético	A/m
$H_{e;c;d}$	Intensidade de campo magnético esquerdo, direita e central	A/m
I, i	Corrente elétrica	A
I_m, i_m	Corrente de magnetização	A
J	Densidade de corrente elétrica	A/m ²
K_{th}	Constante térmica	-
l_{ii}	Coefficientes de autoindução	H
L_M	Coefficientes de indução mútuo	H
L_L	Indutância de carga	H
N	Número de espiras	-
Nu	Número de Nusselt	-
P	Potencia ativa	W
P_{cu}	Potencia no Cobre	W
P_{fe}	Potencia no ferro	W
P_r	Número de Prandtl	
Q	Potencia reativa	var
R, r	Resistência	Ω
r_{ext}	Raio exterior	m
r_{int}	Raio interior	m
$R_{cond;cu;fe}$	Resistência de condução no cobre e no ferro	Ω
R_{conv}	Resistência de convecção	Ω
R_L	Resistência de carga	Ω
R_{fe}	Resistência no ferro	Ω
s	Secção	m ²

S	Potencia aparente	VA
T_{sup}	Temperatura superfície	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C
U, u	Tensão elétrica	V
V	Volume	m^3
W_{diss_hyst}	Energia dissipada por histereses	J
v	Relação transformação	-
ϕ	Fluxo magnético	Wb
Ψ_i	Fluxo ligado ao enrolamento i	Wb
Ψ_{ip}	Componente principal do fluxo ligados ao enrolamento i	Wb
$\Psi_{i\lambda}$	Componente de dispersão do fluxo ligado ao enrolamento i	Wb
v	Relação transformação	-
η	Rendimento elétrico	%
ρ	Densidade mássica	kg/m^3

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A máquina elétrica surgiu em 1886 com a invenção do primeiro gerador de corrente contínua autoinduzido por Werner Von Siemens. Foi este o ponto de partida para o desenvolvimento de outras máquinas elétricas que, na época, apresentavam inúmeras vantagens em relação a outras tecnologias presentes como a máquina a vapor, a roda de água e a força proveniente de animais. Porém, as principais desvantagens que apresentava eram o alto custo de fabricação e a sua fragilidade.

A contínua procura por máquinas elétricas mais baratas e mais eficientes, tem sido um desafio atual da comunidade científica e industrial. A compreensão e estudo destas máquinas é essencial para a difusão destas tecnologias que são cada vez mais incorporadas em novas aplicações em setores de transporte, indústrias, aeroespacial, entre outras. Atualmente existe uma contínua procura global para o desenvolvimento de máquinas elétricas com melhor rendimento, menor peso e custos operacionais mais baixos. Por essas razões, a comunidade científica procura atualmente inovar na construção das máquinas elétricas, com novas geometrias e novos materiais, para alcançar estes objetivos.

Com os novos materiais compósitos magnéticos e materiais supercondutores será possível ultrapassar os atuais limites eletromagnéticos dos materiais ferromagnéticos. Exemplo destes novos materiais é a liga de Hyperco (Hy50), constituída por uma liga de Vanádio-Cobalto-Ferro, que apresenta um alto ponto de saturação magnética (2,4T), uma alta permeabilidade magnética e baixa força coercitiva sob campos magnéticos constantes, permitindo uma rápida magnetização e desmagnetização, e também baixas perdas de histereses sob campos magnéticos variáveis. Esta liga apresenta propriedades magnéticas superiores às de outras ligas magnéticas comerciais de ferro-cobalto [1]-[16]. Esta novo tipo de ligas são atualmente usadas principalmente para aplicações de geração de energia de aeronaves. Estas são utilizadas como chapas laminadas, estampadas a partir de tiras laminadas a frio, e devem ser recozidas a uma atmosfera protetora ou em um ambiente de vácuo, para proporcionar uma combinação ótima de propriedades mecânicas e magnéticas, para suportar as altas tensões.

A característica de alto ponto de saturação magnética é complementar à utilização de supercondutores, onde é possível obter níveis de magnetização superiores às dos ímanes permanentes clássicos. Esta combinação de novos materiais e geometrias são estratégias que podem ser aplicadas para a otimização do rendimento elétrico e da potência específica das máquinas. A descoberta das potencialidades dos materiais supercondutores leva à construção de vários tipos de máquinas elétricas, ditas supercondutoras. Estas possibilidades, tal como outras pressupostas em torno do material Hy50, estão ainda em fase de estudo devido à complexidade do estudo e da sua implementação em aplicações industriais.

A presente dissertação foi impulsionada pela possibilidade de contribuir para o estudo e inclusão desta nova liga de Hy50 em máquinas elétricas. O objetivo deste tema visa

aprofundar e consolidar o enquadramento teórico e prático dos conhecimentos relacionados com as novas ligas de materiais compósitos magnéticos em um transformador monofásico, no campo de interesse da engenharia eletrotécnica e dos materiais.

1.2. Objetivos

Este trabalho centra-se no estudo de uma nova liga de material ferromagnético que possui um ponto de saturação superior aos dos materiais ferromagnéticos típicos. Este elevado ponto de saturação possibilita a complementaridade destes materiais com os supercondutores de alta temperatura crítica. Os principais objetivos deste trabalho são:

- 1) A caracterização eletromagnética e térmica da liga Hy50 através de testes experimentais:
 - a. Medição da curva B-H para vários valores de campos magnéticos aplicados;
 - b. Medição das perdas magnéticas no material;
 - c. Estudo das diferentes características do material, consoante o seu método de tratamento.
- 2) A comparação desta liga com materiais típicos ferromagnéticos;
- 3) A simulação em elementos finitos, com base nos parâmetros obtidos experimentalmente, de um transformador monofásico formado pela liga Hy50.
- 4) Comparação entre o desempenho dos transformadores formados pela liga Hy50 e FeSi.

1.3. Estrutura do Trabalho

A presente dissertação de mestrado está organizada em 5 capítulos nomeadamente em: O primeiro capítulo corresponde à introdução, onde são abordados o enquadramento, os objetivos, a metodologia e a estrutura deste trabalho. No segundo capítulo apresenta-se o estado de arte, com a explicação dos vários tipos de materiais presentes em máquinas elétricas e as suas principais limitações. No terceiro capítulo estuda-se a caracterização eletromagnética e térmica da liga Hy50, usando o ferro silício como comparação. No quarto capítulo são feitos o pré-dimensionamento de dois transformadores, através dos modelos eletromagnético e térmico em parâmetros concentrados e através da simulação em elementos finitos, com dois materiais distintos: 1) a liga em estudo Hy50 e 2) a liga Fe-Si. Neste capítulo efetua-se a comparação entre o desempenho das duas ligas no circuito magnético de um transformador. E finalmente, no quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas e o trabalho proposto para realização futura.

2. Estado da Arte

Neste capítulo são descritas as principais aplicações dos materiais ferromagnéticos em máquinas elétricas, bem como as suas principais limitações devido às perdas nos materiais condutores e às perdas presentes no núcleo ferromagnético. Apresentam-se as principais características diferenciadoras da liga em estudo, Hyperco 50 (Hy50), e as suas principais vantagens e desvantagens.

2.1. Materiais Ferromagnéticos em Máquinas Elétricas

Nas últimas décadas tem-se vindo a registar uma contínua procura pela melhoria dos materiais ferromagnéticos com o objetivo de obter maiores rendimentos elétricos, maiores potências, menores dimensões e menores custos operação e manutenção. A procura de máquinas elétricas de alta eficiência apresenta um papel fundamental nos esforços contínuos para reduzir o consumo de energia elétrica e melhorar a eficiência de dispositivos elétricos.

Os materiais típicos usados em máquinas elétricas são de diversas famílias ferromagnéticas, como por exemplo, da família do ferro-silício (Fe-Si), do níquel-ferro (Ni-Fe), dos aços de laminação de Co-Fe, dos materiais compósitos (MCs) e dos materiais magnéticos amorfos. As ligas de Co-Fe são geralmente as mais caras devido ao seu alto teor de cobalto, contendo uma composição de 48-50% de cobalto, cerca de 48% de ferro e 2% de vanádio [17]. Essas composições podem conter diferentes graus de materiais. Se for ligado com ferro, o Co-Fe atinge a magnetização de saturação máxima de 2,43 T à temperatura ambiente para 35% de cobalto e 65% de liga de ferro [18].

Com este material é possível projetar máquinas elétricas com significativamente reduzidos tamanhos e pesos, originando altas densidades de potência elétrica. Este material é tipicamente usado em núcleos de máquinas para aplicações de aviação onde o peso mais leve compensa o preço mais alto.

As ligas de Ni-Fe possuem também elevados custos, porém são mais versáteis para a utilização em máquinas elétricas. O seu teor de níquel é de 40 a 50%, onde o maior teor de níquel, geralmente, leva a uma maior permeabilidade magnética e a perdas por corrente turbilhonares superiores.

Do ponto de vista das perdas no ferro as ligas Ni-Fe são uma boa escolha quando combinadas com laminas de Fe-Si. A maior vantagem, é a sua coercividade magnética ser muito baixa, o que leva a uma permeabilidade relativa superior em comparação com os materiais Fe-Si. As suas desvantagens são o baixo ponto de saturação e a pequena densidade de fluxo máximo. Em geral, estas ligas são selecionadas para aplicações na indústria das telecomunicações que exijam perdas muito reduzidas, assim como valores de permeabilidade inicial e máxima elevadas para valores de indução relativamente baixos. Além disso, algumas destas ligas possuem propriedades especiais, tais como permeabilidade constante ou ciclo histereses retangular [20].

As ligas de Ferro Amorfo (Fe-Am) não são metais puros e são muitas vezes também chamados de vidro metálico. Estas apresentam uma viscosidade muito maior do que outros metais e ligas no estado líquido [21]. Porém, possuem baixas perdas no ferro devido à sua estrutura de película muito fina (cerca de 0,025 mm) e baixos custos no processo de fabricação [22]. Tipicamente o material amorfo é produzido por fiação por fusão e não pelo procedimento típico de laminação a quente e a frio para a formação das chapas de aço. O estado amorfo do material é obtido pelo processo de arrefecimento rápido, até (10^6 °C/s), aquando a liga derretida toca a superfície de uma roda fria. A estrutura não cristalina também fornece uma maior resistividade elétrica, até três vezes superior às das folhas de laminação Fe-Si. A espessura e a largura são limitadas pelas suas propriedades isotrópicas obtidas durante o processo de fabricação [18]. Atualmente são usadas em transformadores de distribuição e testadas em pequenas aplicações de máquinas de alta velocidade [23], [24]. A utilização em máquinas elétricas com núcleos de estator de material amorfo estão tipicamente na faixa de 10 W a 5 kW.

As ligas de Ferro Silício (Fe-Si) são as mais usadas em nas máquinas elétricas industriais. A adição de silício ao ferro aumenta consideravelmente a sua resistividade, Fig-2.1, diminuindo as perdas no núcleo e a intensidade de saturação magnética, mas não afeta apreciavelmente a sua permeabilidade magnética [4].

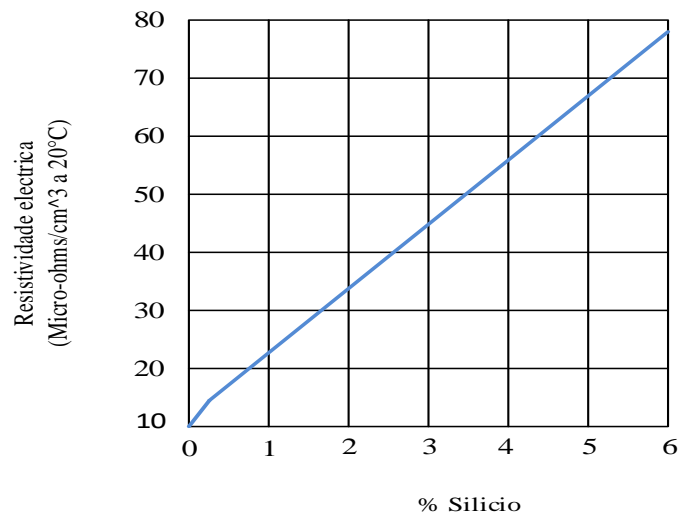


Fig-2.1: Os pontos de operação da máquina na curva de magnetização inicial.

Do ponto de vista das propriedades mecânicas observa-se que o silício, acima de um determinado teor, torna o material frágil e difícil de ser trabalhado, comportamento esse que se verifica na Fig-2.2.

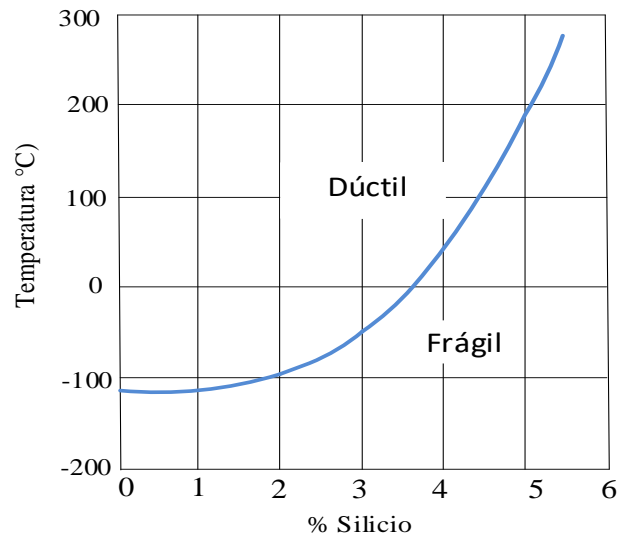


Fig-2.2: Efeito de percentagem de silício e da temperatura no comportamento dúctil e frágil das ligas Fe-Si.

Grande parte das máquinas elétricas é construída por laminas de Fe-Si não orientado, podendo obtido em metalúrgicas como material semi ou totalmente processado. O material semi-processado não passa por um processo de recozimento final e é entregue sem qualquer revestimento. Nas folhas de laminação de Fe-Si não orientadas o teor de ferro varia entre 99%, para baixos aços Fe-Si, e 93%, para Fe-Si altamente ligados. O restante conteúdo do Fe-Si inclui 1% de silício, 6,5% de alumínio e 1% a 0,5% de manganês. O silício faz o ferro mecanicamente mais duro e aumenta a sua resistividade elétrica. A desvantagem da sua utilização é a diminuição do ponto de saturação magnético e a sua menor permeabilidade magnética [25].

Os Materiais Compósitos Magnéticos Macios (em inglês, Soft Magnetic Composites-SMC) são formados por partículas ferromagnéticas eletricamente isoladas com propriedades magnéticas, elétricas e térmicas isotrópicas. Estes tipos de materiais não são produzidos como folhas laminadas, mas sim em pó, compactadas para formar a geometria adequada para o núcleo das máquinas. A vantagem deste processo é a possibilidade de criar geometrias de máquinas especiais com caminhos de fluxo tridimensionais [26]. Essas geometrias arbitrárias são limitadas pela capacidade de processo de compactação para a obtenção de uma pressão uniforme.

Do ponto de vista eletromagnético, os materiais SMC têm uma resistividade elétrica muito alta, diminuindo as perdas provocadas pelas correntes turbilhonares. Esta é uma vantagem importante em aplicações de alta frequência. A principal desvantagem é a sua baixa permeabilidade magnética, a curva de magnetização plana e os valores máximos de densidade de fluxo relativamente baixos [28], [29].

O material SMC é usado para máquinas onde uma distribuição de fluxo tridimensional é vantajoso, como por exemplo, em máquinas de fluxo transversal e axial. Exemplo destes tipos de máquinas é a máquina de indução de geometria esférica desenvolvida utilizando o compósito magnético macio SOMALOY, Fig-2.3. A utilização deste material compósito

permitiu a redução dos custos associados à sua construção e a redução das perdas por correntes turbilhonares na presença dos campos magnéticos com múltiplas orientações originados devido à geometria esférica. Os principais obstáculos encontrados na utilização do SMC focam-se no seu baixo valor de permeabilidade magnética, quando comparado com os dos materiais ferromagnéticos clássicos e nas suas propriedades mecânicas, mais quebradiças e menos flexíveis devido a sua constituição em pó [30].



a)



b)

Fig-2.3: a) Protótipo atual de um motor esférico utilizando Somaloy; b) Estator do motor construído utilizando o material Somaloy.

2.2. Principais limitações Ferromagnéticas devido as Perdas no Núcleo.

A dissipação de energia em meios ferromagnéticos pode ser dividido em duas partes: perdas por histerese e perdas por correntes de Foucault. Quando sujeitas a uma magnetização alternada, os alinhamentos das massas ferromagnéticas libertam energia sob a forma de calor. Este aspeto é importante do ponto de vista económico e do também do ponto de vista da engenharia, pois consiste na redução do rendimento elétrico do motor que traduz perdas adicionais e redução da viabilidade económica [31].

2.3. Perdas devido às Correntes Turbilhonares

De acordo com a lei de Faraday, são induzidos nos materiais forças magnetomotrizas (f.e.m.) que induzem correntes turbilhonares de Foucault que circulam no material, conforme ilustrado na Fig-2.4. Estas correntes circulam num plano perpendicular às linhas de fluxo. Devido ao seu sentido de circulação e de acordo com a lei de Lenz, o fluxo produzido por estas correntes opõe-se ao fluxo indutor. Estas perdas podem tomar valores consideráveis com o aumento da temperatura dos materiais.

Uma das medidas a tomar para a diminuição destas perdas, pode ser a laminação do núcleo ferromagnético em chapas magnéticas de pequenas espessuras, confinando assim as correntes parasitas em trajetórias de pequena secção transversal.

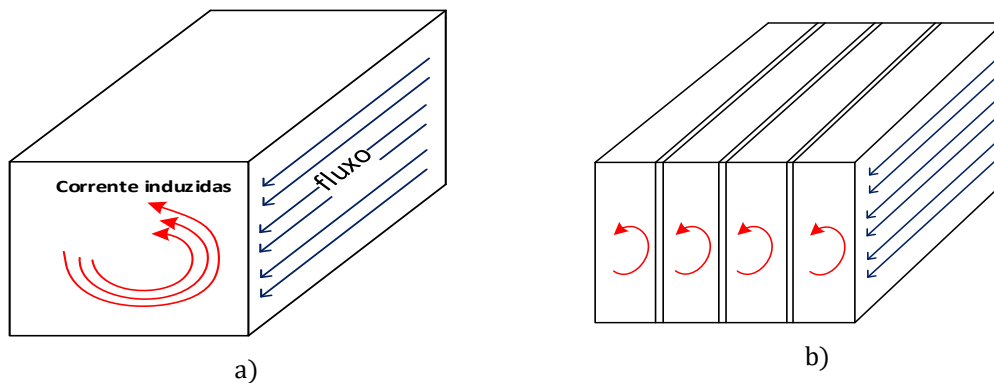


Fig-2.4: a) - Correntes parasitas no núcleo de ferro maciço; b) - Laminas de ferro isoladas entre si.

2.3.1. Perdas de Histereses

Durante a magnetização e desmagnetização de um núcleo ferromagnético, devido à rotação dos domínios, produz-se libertação de calor, denominado por perdas por histerese. Estas perdas traduzem a energia necessária para completar a reorientação dos domínios durante cada ciclo dos fluxos magnéticos aplicados ao material. A área fechada do ciclo histerético criada pela aplicação destes fluxos é diretamente proporcional à energia dissipada durante um ciclo e por unidade de volume do material magnético. Os processos necessários para reduzir este tipo de energia consistem no aumento da qualidade dos materiais, isto é, garantindo uma forma do ciclo Histerético estreita, aumentar a sua resistividade e reduzir as dimensões através de secções e comprimentos dos circuitos magnético [32].

2.3.2. Saturação Magnética

Devido ao efeito de saturação em materiais ferromagnéticos, máquinas elétricas são geralmente projetadas para funcionar abaixo do ponto de saturação (correspondente ao joelho da curva de magnetização BH), como é mostrado na Fig-2.5. Para cada material magnético a curva BH é diferente e dependente da geometria da máquina. Para o dimensionamento racional de uma máquina são necessários analisar as perdas no cobre e no ferro, o volume e peso do núcleo, entre outros fatores.

A Fig-2.5 ilustra a curva de magnetização BH , do material magnético. Os dados são coletados de vários fabricantes de materiais. Além disso, o tamanho dos círculos reflete as perdas no ferro dependentes da frequência imposta, Fig-2.6. Para obter uma estimativa

aproximada sobre o valor absoluto das perdas específicas no ferro, os círculos são mapeados para uma barra de cores abaixo do eixo X. Isto ajuda também a identificar o intervalo de perdas dos diferentes diagramas para diferentes frequências. Através de uma comparação visual entre materiais é possível classificar objetivamente o material e selecionar o adequado para uma determinada aplicação da máquina.

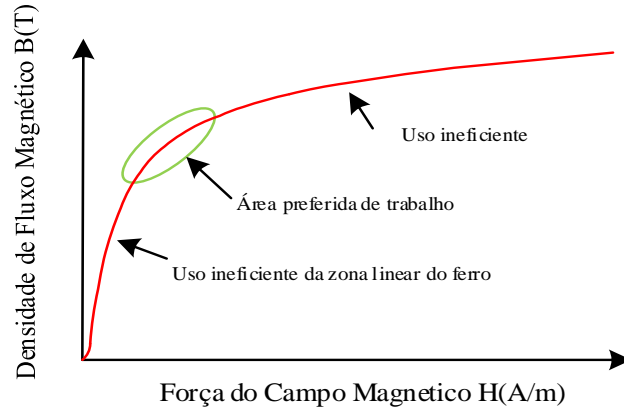


Fig-2.5: Os pontos de operação da máquina na curva de magnetização inicial.

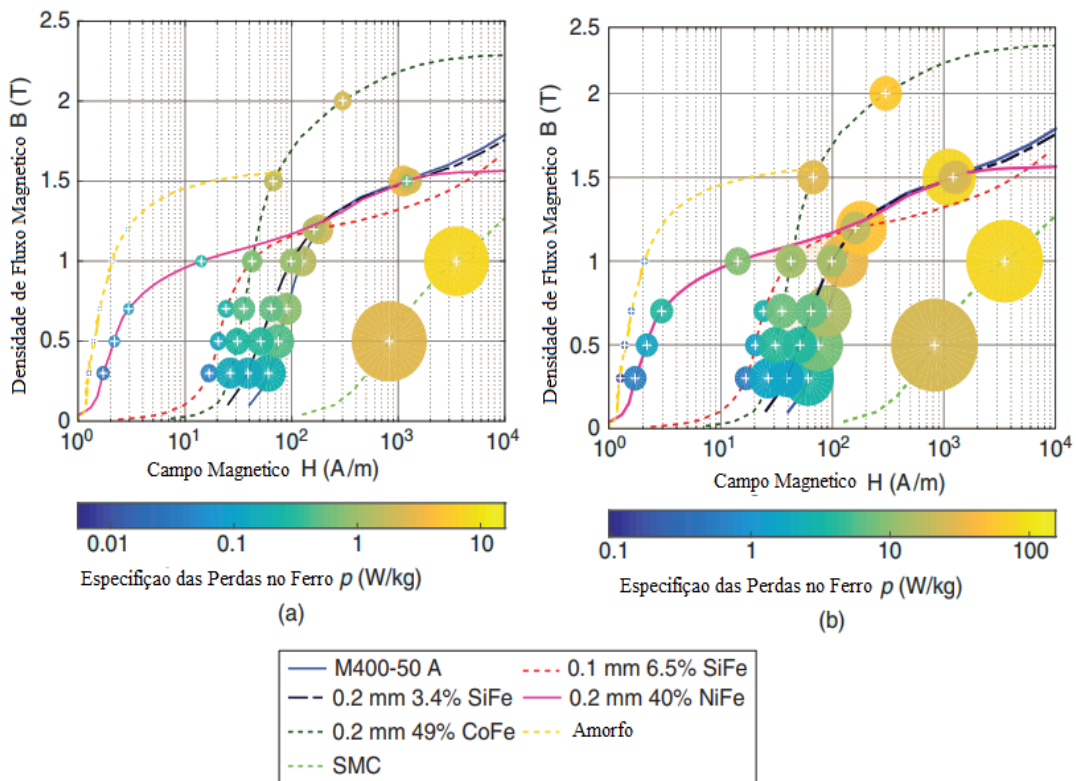


Fig-2.6: a) perdas no ferro a 50 Hz e b) perdas no ferro a 400 Hz [34].

Na Fig-2.6 os materiais não-cristalinos amorfos têm, de longe, as menores perdas no ferro e apresentam menor densidade de fluxo magnético. Para os materiais cristalinos, os dois materiais mais caros, Ni-Fe e Co-Fe, possuem também baixas perdas no ferro (a 50Hz) e baixos pontos de saturação magnética. Para frequências mais altas (400 Hz), o Fe-Si ligado

(6,5% de silício) pode atingir o mesmo nível de perdas no ferro que as folhas de Ni-Fe. As folhas de Ni-Fe tem um teor de níquel de 48% e alcançam tipicamente valores de perda no ferro ainda menores.

Os materiais magnéticos nos motores fabricados podem apresentar propriedades diferentes das exibidas nas folhas de catálogo devido à sua deterioração durante o processo de fabricação. Isso ocorre devido às tensões causadas pelo corte, soldadura e outras etapas de fabricação [34], [35]. Além disso, diferentes materiais reagem de forma diferente para cada etapa de fabricação.

O corte a laser, normalmente usado em protótipos e em pequenas séries de produção, introduz um esforço térmico elevado no recorte da folha de laminação. As ligas de Ni-Fe são mais sensíveis a um esforço mecânico e possuem perda no ferro superiores devido ao processo de soldagem do que as ligas Fe-Si [37].

As perdas por histerese são influenciadas principalmente pelo processo de fabricação e pelas tensões internas resultantes. Sendo que, grãos magnéticos maiores culminam em melhores propriedades magnéticas e uma diminuição nas perdas por histerese, esta é geralmente mais pronunciada do que o aumento das perdas devido a grãos maiores. As espessuras das chapas têm impacto nas perdas por histerese, mesmo que uma dependência explícita à espessura não esteja presente nas formulações de perdas por histerese [38].

O processo de recozimento é indispensável para obter o desempenho magnético total das folhas de laminação. Sendo a influência do recozimento da curva de magnetização das lâminas de Co-Fe e Ni-Fe de 0,2, mostrada na Fig-2.7, para os materiais cristalinos os resultados das duas topologias confirmam a ligação entre a estrutura de maior material granular e a propriedades magnéticas melhoradas, tais como uma maior permeabilidade e magnetização de saturação.

O desempenho das máquinas elétricas com laminação Fe-Si depende do processo de recozimento, onde as perdas por histerese são significativamente reduzidas após esse processo [39], [40]. Esse processo alivia principalmente a tensão imposta ao cortar e perfurar o material, porém os grãos magnéticos crescem durante este procedimento [41]. Ambos os fatores influenciam apenas as perdas por histerese.

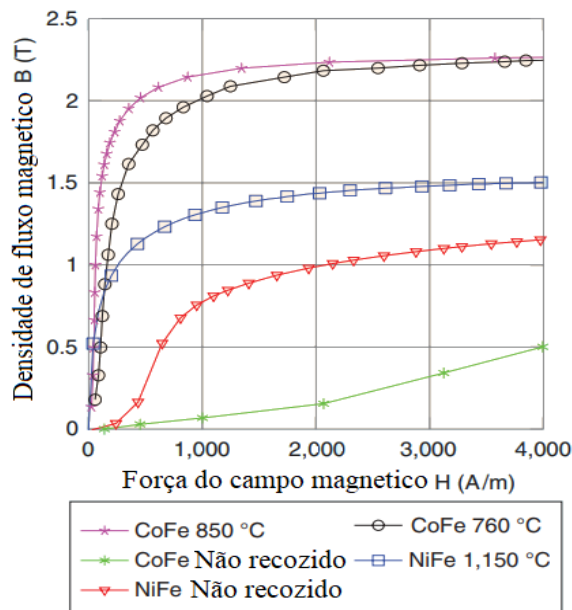


Fig-2.7: A influência do coroamento na curva BH de magnetização do Co-Fe e Ni-Fe.

2.4. Estudos de Novos Materiais Supercondutores e Compósitos Magnéticos Hy50

Para ultrapassar os limites atrás mencionados, surgiu estudos sobre novos materiais supercondutores de alta temperatura crítica (SATC) e os materiais compósitos magnéticos, como o Hy50. Do ponto de vista de saturação, o Hy50 apresenta um aumento do ponto de saturação para os 2.4T e apresenta também perdas no ferro baixas.

2.4.1. Supercondutividade

Nos meados do século XX, os materiais supercondutores de alta temperatura crítica (SATC) continham baixas resistências elétricas, devido à sua característica intrínseca, que permitiram o desenvolvimento de máquinas elétricas de alto rendimento elétrico e com grandes valores de densidades de fluxo magnético. Com o seu desenvolvimento foi possível abandonar o hélio líquido (4,2 K) como meio criogénico e utilizar o azoto líquido, reduzindo assim os custos do sistema de arrefecimento. Com o descobrimento de SATC, acima dos 77 K, tornou-se mais eficaz o sistema de arrefecimento através de nitrogénio líquido, o que voltou a despertar novos interesses comerciais.

A utilização de SATC em máquinas elétricas permite a substituição dos sistemas clássicos de excitação ou a redução da dispersão magnética quando utilizados como “ecrã magnéticos”, ou a substituição dos enrolamentos tipicamente de cobre [42]. Os tipos mais comuns de SATC são em fita e em bloco de forma cubica ou cilíndrica.

A BSCCO de primeira Geração (1G) [43] conhecido como fitas supercondutoras 1G, foram desenvolvidos no período de 2000 a 2005 e são compostos pelo supercondutor BSCCO-2223 (ou simplesmente Bi-2223), encapsulado na forma de fita e com uma matriz de prata. Apesar de todas as vantagens apresentadas por este material, as fitas 1G tiveram a sua produção limitada por fatores econômicos. Este material foi bastante utilizado nos protótipos de transformadores e é muito sensível à ação de campos magnéticos externos, principalmente se forem perpendiculares à fita. Na presença de campos externos, a densidade de corrente é bastante reduzida, ou até mesmo anulada.

A segunda geração das fitas supercondutoras YBCO foram uma solução alternativa às fitas 1G [43]. À sua semelhança consistem em um material SATC encapsulado na forma de fita ou em forma de cubo, neste caso formado por Ítrio-Boro-Cobre. As fitas 2G apresentam comportam-se como um cristal monocristalino, possuindo uma maior capacidade de aprisionamento de fluxo magnético e proporcionando um maior valor de densidade de corrente crítica em relação às fitas 1G.

Os materiais das fitas supercondutores são fabricados por um processo denominado de PIT (“Pó no Tubo”) e são usadas frequentemente para fazer condutores elétricos, como no caso do cerâmico BSCCO. A realização desse processo de PIT, especificamente para a fita de mono filamento, é iniciado através da adição do pó precursor (de material supercondutor) dentro de uma matriz cilíndrica de prata. De seguida, o tubo é alongado por estiramento e finalmente compactado, inserido entre dois rolos paralelos de um laminador de placas, de forma a ficar em formato de fita. No caso de se tratar de uma fita multifilamento, em vez de um único cilindro, vários são compactados dentro de uma maior cápsula de prata. A última fase do processo consiste em sujeitar o conjunto a uma temperatura próxima a 850 °C, como ilustra na Fig-2. 8.

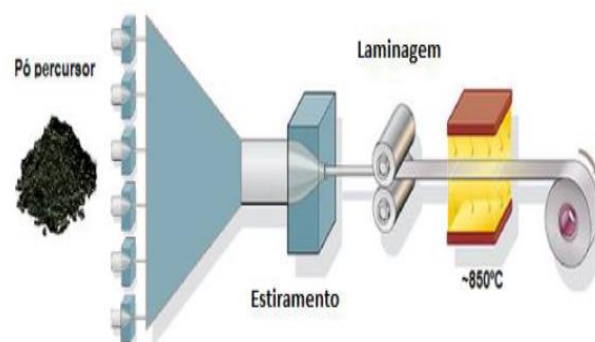


Fig-2. 8: Processo PIT [43].

Como na maioria das fitas 2G, esta é composta por várias camadas de materiais a fim de conferir estabilidade térmica, bom contato elétrico, proteção ao material supercondutor e flexibilidade. Além disso possui camadas estabilizantes e passivas que orientam a estrutura cristalina do YBCO na fabricação do filme, Fig-2.9. O seu processo de soldagem é delicado e exige diversos cuidados de manuseamento e de conservação de suas propriedades que garantem a supercondutividade [43].

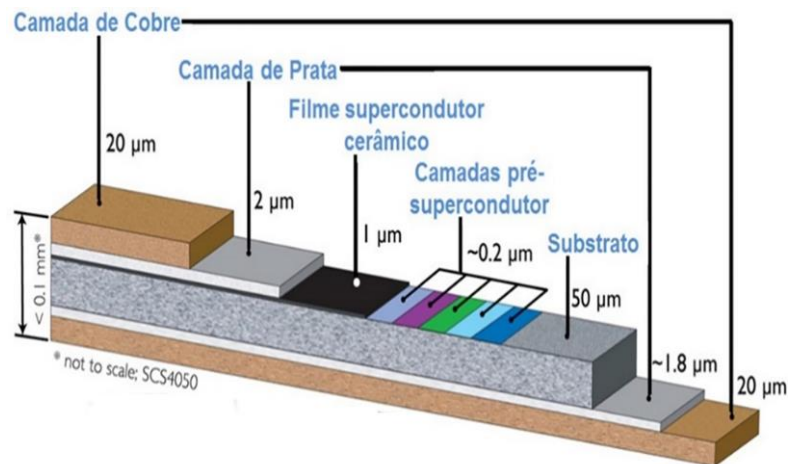


Fig-2.9: Esquema estrutural da fita 2G HTS [43].

Os materiais supercondutores apresentam também propriedades de resistividade nula. Trata-se da expulsão total (Tipo I) ou parcial (Tipo II) do fluxo magnético do interior do material supercondutor, quando este se encontra na presença de um campo magnético externo. Esse efeito é conhecido por efeito Meissner. Ao arrefecer este material abaixo da temperatura crítica, dois processos podem ocorrer:

- 1) Foi arrefecido na presença de campo. Neste caso, após a sua passagem à supercondutividade, qualquer alteração ao campo inicial leva o supercondutor a criar correntes de forma a manter o campo interno;
- 2) Foi arrefecido na ausência de um campo. Neste caso, depois de passar a supercondutor, este irá repelir qualquer campo exterior, através da criação de correntes que produzem o campo contrário.

Na Fig-2.10 apresentam-se blocos supercondutores que podem substituir a utilização de magnetos permanentes em máquinas elétricas, já que estes podem ser magnetizados com campos superiores a 2T a uma temperatura de 77 K. Estes valores vão ao encontro das oportunidades de utilização das novas ligas de materiais ferromagnéticos.

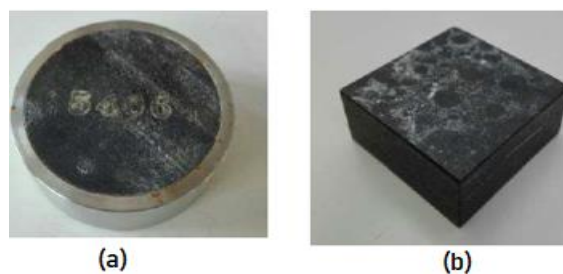


Fig-2.10: Material HTS atualmente usado em trabalhos científicos:(a) GdBCO e (b) YBCO.

2.4.2. Hyperco50

Ao longo das últimas décadas foram extensivamente estudadas as ligas de Hyperco50, de forma a melhorar as propriedades ferromagnéticas dos materiais clássicos, [1] a [15]. Esta liga é caracterizada pela sua alta saturação magnética (2,4T), alta permeabilidade magnética, baixa coercitividade magnética, e baixas perdas de núcleo sob campos magnéticos alternados.

Essas ligas são produzidas em forma de tira e necessitam de um tratamento térmico final. Este tipo de tratamento tem sido usado principalmente na fabricação de laminação de partes de motores e geradores para aplicações de geração de energia em aeronaves e, mais recentemente, em rolamentos magnéticos de veículos elétricos. Essas laminações são estampadas na forma desejada a partir da faixa laminada a frio e são recozidas em um ambiente protegido com hidrogênio ou vácuo, a uma temperatura adequada para fornecer uma combinação ideal de propriedades mecânicas e magnéticas.

Apesar de se usar esse método de estampagem, existe a opção para substituir a estampagem de laminações para uma das alternativas adequadas de técnicas de cortes de metais, especialmente com o corte de peças que permitem uma maior precisão e menores tolerâncias [1].

Com base nas pesquisas biográficas verifica-se que as ligas Hy50 tem uma composição nominal de 0,01% em peso e 0,05% em massa de Manganês, 0,05% em peso de Silício, 0,05% em peso de Nióbio, 1,90% em massa de Vanádio e 48,75% em massa de Cobalto-Ferro. Para se atingir as propriedades necessárias do Hy50 é necessário a realização de três processos de laminações, de estampagem e maquinação por descargas elétricas (EDM) [42]. Estão descritas três condições de recozimento e corte de laminação na Tabela 2.1.

Estes processos de laminação foram corados a 1589 °F (865°C) por 4 horas em hidrogênio seco e arrefecidos a 185 °F (85 °C) por hora à temperatura ambiente, para fornecer uma combinação ideal de propriedades magnéticas e mecânicas [43].

Tabela 2.1-A matriz do estudo referente ao método de laminação e recozimento para laminados de liga Hy50

Condições	Método de corte de laminação	
	Estampagem	Fio-EDM
Corte não recozido	ST	ED
Corte seguido de Recozimento	STfA	EDfA
Recozimento seguido de corte	AfST	AfED

A Fig-2. 13 no apêndice B mostra as micrografias do corte na laminação do Hy50 de corte estampado e fio-EDM para várias condições de recozimento. Os materiais

estampados (ST, STfA e AfST) mostram uma superfície típica cortada, enquanto o material de corte de fio-EDM (ED, EDfA e AfED) possui superfícies irregulares típicas de uma superfície de corte de fio-EDM [48],[50],[51].

Na Fig-2. 11 apresentam-se as curvas BH para as seis condições diferentes do material (ST, STfA, AfST, ED, EDfA e AfED) sob investigação. Em geral, e como seria de esperar, os materiais recozidos (STfA, AfST, EDfA e AfED) possuem características magnéticas significativamente superiores em comparação com os materiais não cozidos (ST e ED). O recozimento final da laminação a frio é obrigatório para proporcionar propriedades magnéticas superiores para adequar a qualquer serviço ou aplicação.

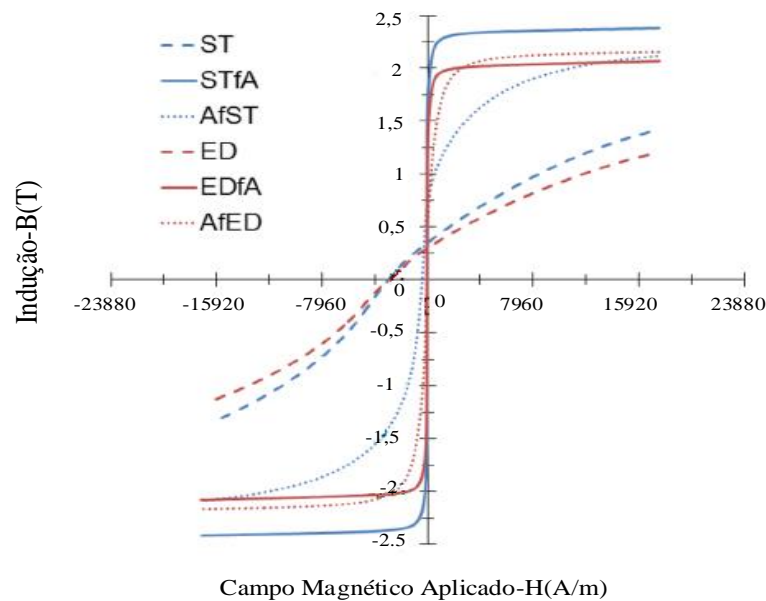


Fig-2. 11: Comparação da curva BH para diferentes condições de laminação de corte: ST, STfA, AfST, EDM, ED, EDfA, AfED [1].

Os materiais ST têm indução relativamente mais alta (B) em comparação com os ED. Por outro lado, ST e ED, parecem ter coercividades similares ($H = 2945.2$ A/m). Nos materiais magnéticos não recozidos, H é relativamente alto, devido à presença de grãos alongados devido à grande tensão residual transmitida durante laminação a frio, devido a estampagem [16].

A tensão residual mecânica, transmitida devido à estampagem, é significativamente maior do que o esforço residual térmico, devido ao fio-EDM [46]–[50]. O valor de H similar para os materiais ST e ED indica que a contribuição combinada de grãos alongados e tensão residual, devido a laminação a frio (deformação plástica), são significativamente grandes em comparação com a tensão residual transmitida devido ao corte.

Os materiais inicialmente cortados e depois recozidos, os STfA e o EDfA, parecem saturar em um campo magnético próximo de 2500A/m e a 2,0 e 2,4 T.. O recozimento final após o corte (fio-EDM ou estampagem) provavelmente tornará as laminações do anel STfA

e EDfA livres de qualquer tensão residual e os valores de H semelhantes ao STfA e EDfA indicam a presença de cobre na borda do corte da EDfA.

No caso dos materiais com recozimento antes dos cortes (AfST e AfED) o seu campo de indução magnética é relativamente inferior aos apresentados pelo STfA e EDfA. Os AfED são relativamente "magneticamente mais suaves" do que os materiais AfST devido ao esforço residual transmitido na estampagem. Para as seis condições diferentes de corte e de recozimento, são obtidas diferentes características electromagnéticas.

Após a verificação das propriedades nos materiais em termos de perdas no núcleo, de várias condições de corte das laminações, houve a necessidade de fazer vários ensaios, como consta na Fig-2. 12 [50]. Os resultados das perdas totais do núcleo (P_T) foram obtidos em várias condições em frequência de 60 Hz e 400 Hz para um B a variar entre 0.5-2T. Como seria esperado as perdas no núcleo aumentam com o aumento em B. A 60Hz, Fig-2. 12 a), a situação STfA tem as menores perdas de entre todos os materiais magnéticos recozidos. O EDfA possui maiores perdas no núcleo (~ 8-11%) em comparação com o STfA.

Os materiais magnéticos que foram cortados após o "recozimento final" têm um valor de perdas significativamente maior quando comparadas com os materiais que foram cortados primeiro e depois recozidos. O valor das perdas no núcleo de vários anéis recozidos são sequenciadas, do valor menor para o maior, como STfA>EDfA>AfED>AfST.

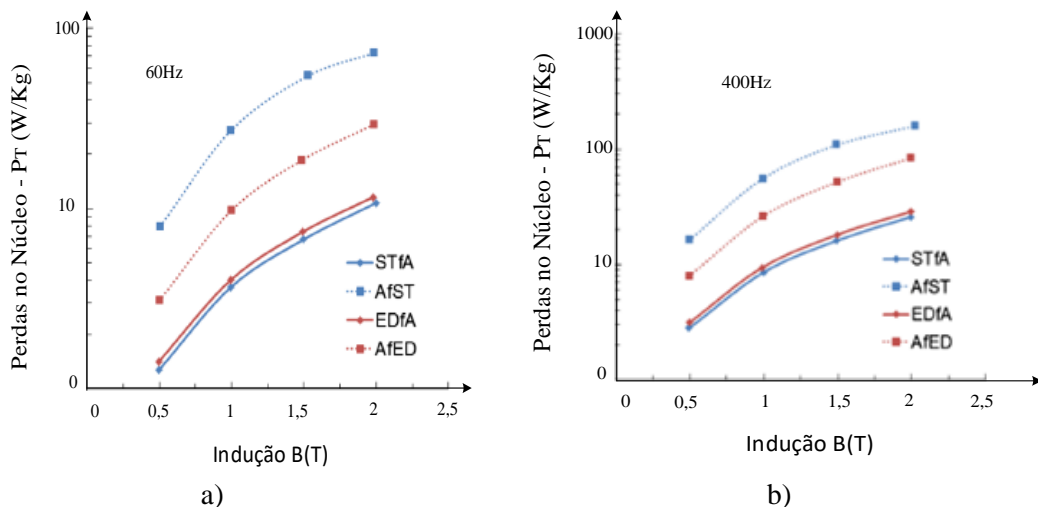


Fig-2. 12: a) 60 Hz e b) 400 Hz. (B variando de 0,5T a 2T) para laminados de anel em liga Hy50 estampado e cortado por fio: STfA, AfST, EDfA, AfED. [50].

3. Características Eletromagnética e Térmica da Liga de Hyperco50.

Neste capítulo, o objetivo é analisar o material Hyperco (Hy50) sobre o ponto de vista das suas características eletromagnéticas e térmicas e sobre a sua potencialidade quando inserido em máquinas elétricas. Para efeitos de comparação, esta liga será comparada com o material Ferro Silício (Fe-Si).

3.1. Características Eletromagnéticas.

Das características eletromagnéticas principais, destacam-se a saturação magnética, a sua permeabilidade magnética e as perdas no material quando exposto a um campo magnético variável.

A saturação e permeabilidade magnética, usualmente conhecida como curva B-H, é uma das características mais importantes no dimensionamento de uma máquina elétrica. Esta indica o nível de fluxo magnético que o material é capaz de suportar e, que por sua vez, está intrinsecamente ligada à origem das perdas de origem magnética no material. Desta forma, foram obtidas experimentalmente a curva B-H e as perdas no material Hy50 e comparadas com as do material Fe-Si.

3.1.1. Metodologia para Obtenção da Curva BH Dos Materiais

Para a determinação da curva B-H da liga Hy50 construiu-se um núcleo magnético formado pelas dimensões constadas na Fig.3. 2 b) e constituído por duas partes, uma em forma de “E” e outra em forma de “I”, na Fig.3. 2. Na coluna central do circuito magnético são colocados dois enrolamentos de cobre, o primário e secundário, cada um com N espiras. Com isto, é possível utilizar este circuito para medir o campo magnético criado pelas correntes impostas no enrolamento do primário.

O campo de indução magnética pode ser medido diretamente através de uma sonda de efeito de Hall, Fig.3. 3, ou indiretamente através da tensão induzida no enrolamento secundário.

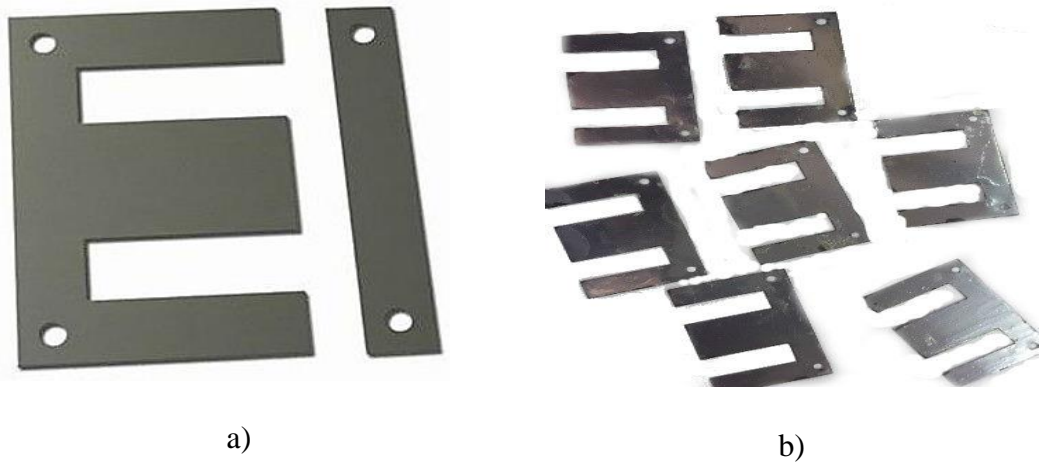


Fig.3. 1: a) - Formato da liga Fe-Si "E" e "I" separados, mas a Bobine. b) - Formato da liga Hy50 "E" e "I" separados, mas a Bobine.

Com base na figura acima, foi contruído um transformador tal com o protótipo representado na Fig.3. 2 a), de acordo com as seguintes especificações descritas na Fig.3. 2 b).

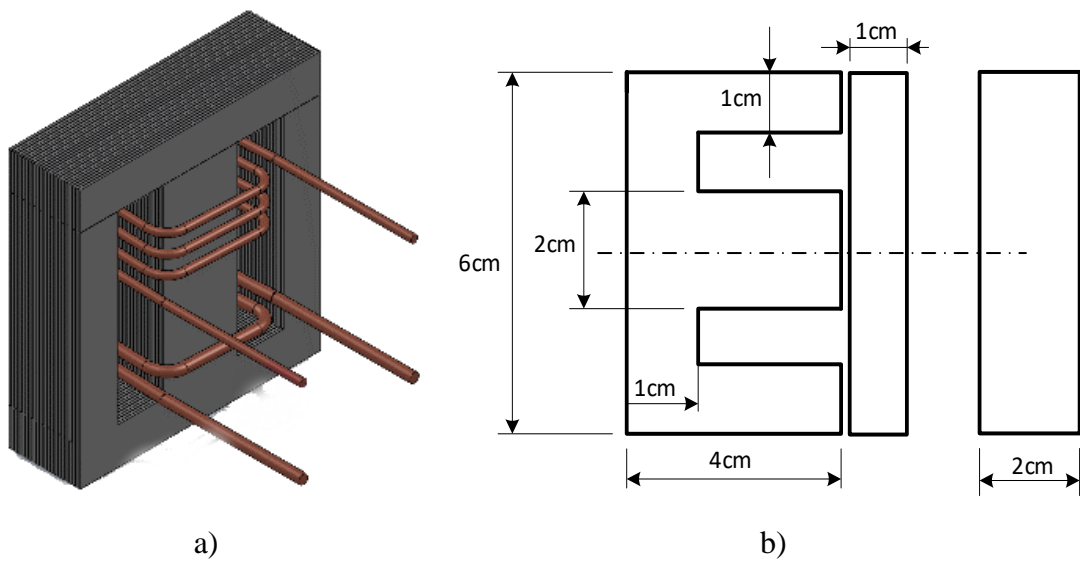


Fig.3. 2: a) - Protótipo desenvolvido para medição da curva B-H da liga Hy50 e Fe-Si, b) - Dimensões do protótipo desenvolvidos do núcleo formado por "E" e "I"

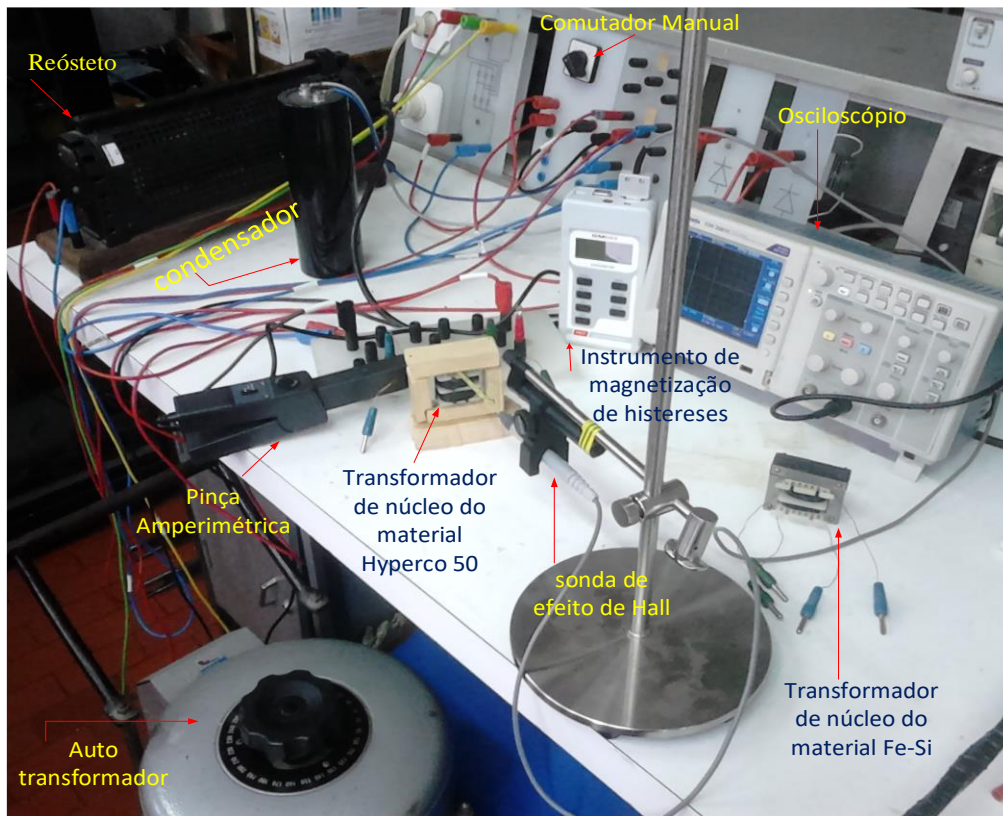


Fig.3. 3: Montagem do circuito magnético completo com sonda de efeito de Hall para medição do campo magnético em ensaio em Vazio.

Em paralelo, foi também construído o mesmo circuito em material Fe-Si, para serem realizados os mesmos ensaios que no material Hy50. Com isto é possível obter uma base de comparação entre a nova liga e os materiais clássicos utilizados em máquinas.

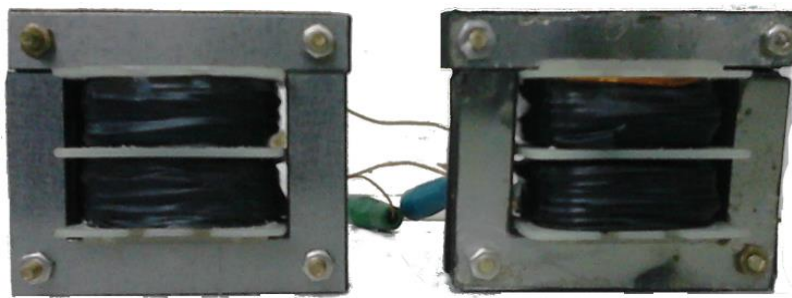


Fig.3. 4: Transformador desenvolvido para a realização dos ensaios: à esquerda feito de Fe-Si e à direita de Hy50.

Após medição da corrente imposta num dos enrolamentos, é possível estimar a intensidade do campo magnético, H , utilizando a formulação integral da lei da Ampère, dada pela equação (3. 1), que relaciona o campo magnético e a corrente que o produz. Esta formulação é considerada válida porque as frequências e os tamanhos envolvidos são tais, que a corrente de deslocamento pode ser desprezada. Para os cálculos do campo magnético foram desprezadas as fugas magnéticas presentes no circuito.

Com base nas dimensões do circuito magnético desenvolvido na Fig.3. 5 e através da equação (3. 1) é possível obter a relação descrita pela equação (3. 2), onde, H_d , H_e e H_c representa a intensidade do campo magnético nas colunas da direita, da esquerda e central do núcleo, respetivamente.

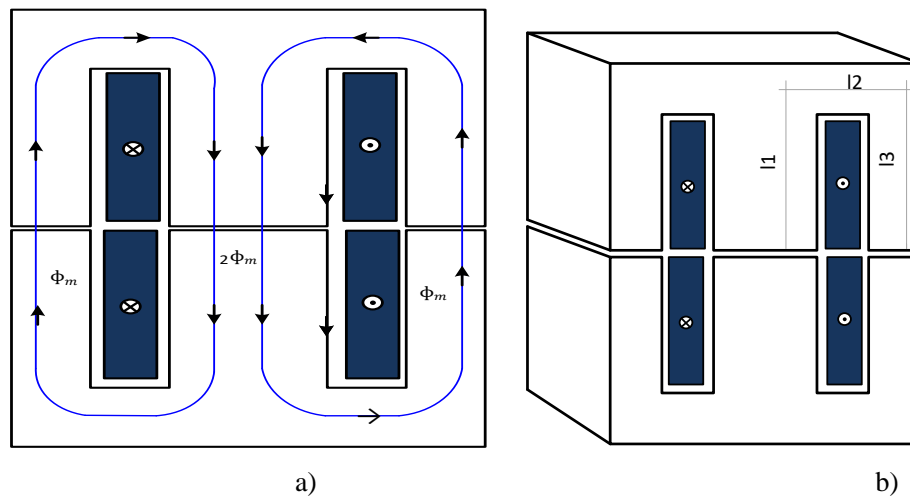


Fig.3. 5: a) - Circuito magnético EE 2D; b) - Circuito magnético EE 3D

$$\oint_C \mathbf{H} \, dl = \iint \mathbf{J} \, nds \quad (3. 1)$$

$$\oint_C \mathbf{H} \, dl = NI \leftrightarrow 2H_c l_1 + 2H_d(l_2 + l_3) = NI \quad (3. 2)$$

Admitindo a homogeneidade do núcleo magnético e desprezando as fugas magnéticas no circuito é possível relacionar os valores de campo magnético entre cada coluna, através da lei dos cortes (ou lei dos nós).

$$\sum_{\cup} \phi_i = 0 \quad (3. 3)$$

$$\phi_e + \phi_d = \phi_c \quad (3. 4)$$

Pela simetria do circuito resulta $\phi_e = \phi_d$ e como as secções das colunas laterais são o dobro da central obtém-se:

$$\begin{cases} \phi_e = B_e S \\ \phi_c = B_c 2S \\ \phi_d = B_d S \end{cases} \rightarrow B_e = B_d = B_c = B \quad (3.5)$$

Assim pode se considerar que as intensidades do campo magnético em cada coluna do circuito possuem valores iguais. Então, verifica-se a seguinte relação pela equação (3.6).

$$2H(l_1 + l_2 + l_3) = NI \leftrightarrow H = \frac{NI}{2(l_1+l_2+l_3)} \quad (3.6)$$

Para a determinação do campo de indução magnética foram utilizadas duas metodologias: 1) a medição direta do campo através da utilização de uma sonda de efeito de Hall ou 2) através da medição indireta, aplicando a lei geral de indução, resultante da medição da tensão aos terminais do enrolamento secundário. Para a determinação indireta do campo de indução magnética usou-se a lei geral de indução, equação (3.7). Esta pode ser aplicada aos terminais do enrolamento primário ou secundário, Fig.3. 6 a) ou b), respetivamente.

Para medição indireta do campo de indução magnética, foi aplicada uma corrente no enrolamento do primário, Fig.3. 6 a), e lida a tensão induzida no enrolamento do secundário, Fig.3. 6 b). Apesar de ser possível relacionar a tensão, a corrente e o fluxo no primário e consequentemente obter uma estimativa do campo B no núcleo magnético, é possível obter uma melhor estimativa do campo através do secundário. Ao aplicar-se a lei geral de indução no primário, são necessárias as leituras da corrente e tensão para a determinação do campo (3.8). Utilizando a lei geral de indução no secundário em vazio (sem corrente) a determinação do campo B, apenas deriva da leitura da tensão, (3.8). Nesta expressão, os erros associados aos equipamentos de medida possuem uma menor influência na determinação do campo.



Fig.3. 6: Ilustração do fluxo no interior do núcleo.

$$\oint E dl = -\frac{d\Psi_1}{dt} \Leftrightarrow r_1 i_1 - u_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} \quad (3.7)$$

$$\Leftrightarrow r_1 i_1 - u_1 = -\frac{d(NBS)}{dt} \Leftrightarrow B = \int_0^t \frac{u_1 - r_1 i_1}{NS} dt$$

$$\oint E dl = -\frac{d\Psi_2}{dt} \Leftrightarrow u_2 = \frac{d\Psi_2}{dt} \Leftrightarrow u_2 = \frac{d(NBS)}{dt} \Leftrightarrow B = \int_0^t \frac{u_2}{NS} dt \quad (3.8)$$

3.1.2. Metodologia para Estimativa das Perdas no Núcleo

As perdas no núcleo são devidas à presença de correntes induzidas e devido à saturação do núcleo magnético devido ao fenómeno de histereses. A sua medição é complexa e apenas possível de forma indireta. Os métodos indiretos aqui utilizados para a determinação das perdas no núcleo foram os seguintes: 1) através do balanço de potência no circuito e 2) através da variação de energia magnética durante um ciclo de variação do campo magnético.

Para a aplicação do balanço de potência foram realizados ensaios em vazio com tensões alternadas sinusoidais aos circuitos magnéticos em “E-I” desenvolvidos. Nestes ensaios foram registadas a tensão e a corrente do primário. Após a recolha dos dados, calcularam-se as perdas no cobre, por meio da equação (3.9), e a potência de entrada (3.10).

Do balanço de potência, as perdas no núcleo podem ser obtidas através da equação (3.11), onde W_{diss_hyst} corresponde à energia dissipada durante um ciclo de histereses.

$$P_{cu} = RI_{ef}^2 \quad (3.9)$$

$$P_{in} = U_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad (3.10)$$

$$P_{fe} = P_{in} - P_{cu} \approx \frac{W_{diss_hyst}}{\Delta T} \quad (3.11)$$

3.1.3. Ensaios Experimentais Para Determinação da Curva BH

Para a obtenção da característica BH da nova liga Hy50 foram realizados dois ensaios experimentais ao circuito magnético apresentado na fig. 3.2 em circuito aberto (corrente do secundário nula): 1) aplicando uma tensão alternada sinusoidal de frequência de 50Hz (Fig.3.7 a) e 2) aplicando impulsos de corrente para a obtenção de correntes mais elevadas (Fig.3.7 b).

As figuras abaixo mostram os circuitos utilizados para cada ensaio experimental e também o tipo de impulso de corrente originada pelo circuito da Fig.3.7 b).

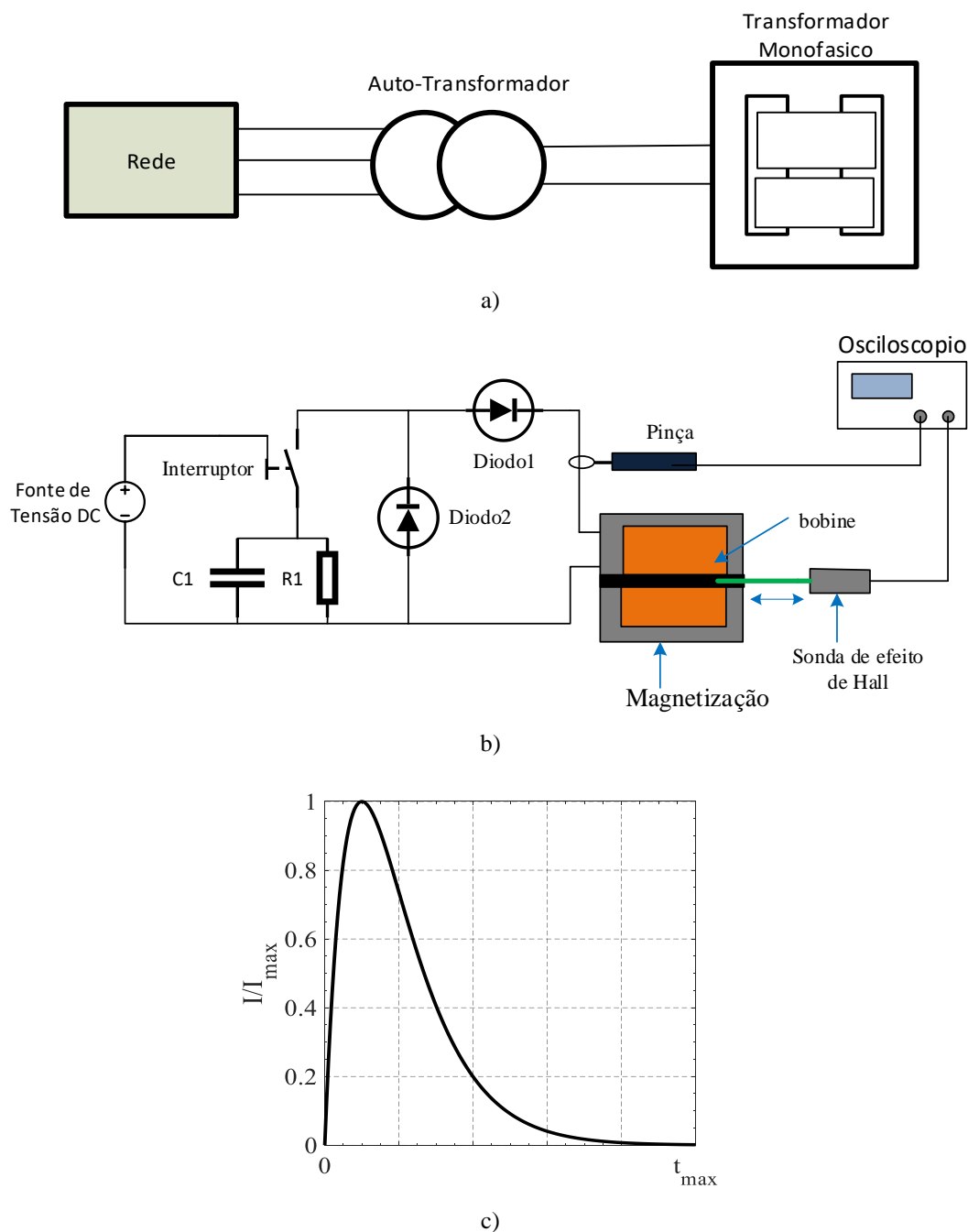


Fig.3. 7: a) - Circuito para aplicação uma tensão alternada sinusoidal, b) - circuito para aplicação de impulsos de tensão e c) - impulso de corrente gerado pelo circuito em b).

No primeiro ensaio, com tensões alternadas sinusoidais, foram aplicados valores de tensão até obter-se correntes de aproximadamente 6A, valor nominal para o fio de cobre utilizado de 0.7 mm de diâmetro.

A curva BH obtida apresenta-se na Fig.3. 8. O comportamento da curva BH do material Hy50 não é o esperado. Comparando a curva BH dos dois materiais, a curva do material Hy50 é inferior em relação ao ferro silício. Neste ensaio não é claro que os materiais

atingem o seu ponto de saturação, sendo necessários valores mais elevados de corrente para os atingir.

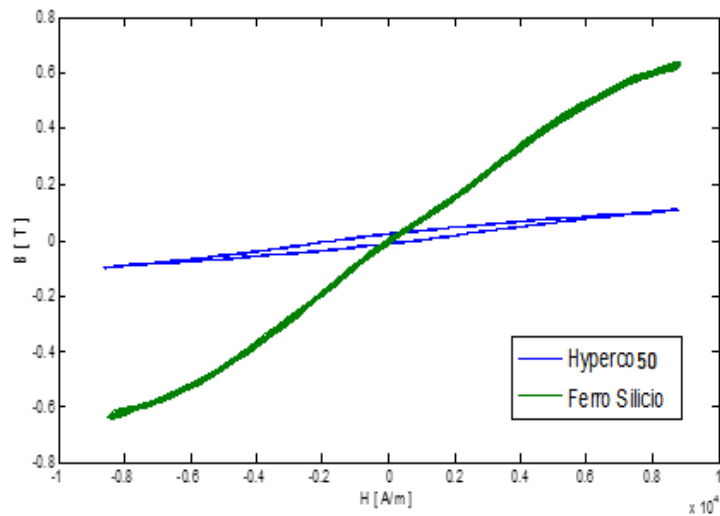


Fig.3. 8: Curva BH do Ferro Silício e Hy50

Para ser possível atingir valores de corrente superiores sem danificar o material, recorreu-se a um ensaio com impulsos rápidos de corrente, Fig.3. 7 b). Agora com correntes maiores é possível atingir valores de campo superiores. Os valores médios da curva BH do material Hy50 apresentam valores baixos para baixos valores de campo magnético, onde o Fe-Si apresenta maiores valores de campo B. Para intervalo de intensidade de campo H, entre 3×10^5 e $3,5 \times 10^5$ A/m é possível observar um crescimento superior do campo B para material Hy50. Na tabela 3.1 apresentam-se os valores máximos de tensão e corrente utilizados no impulso de corrente e os respectivos valores de campo B e H obtidos.

Tabela 3. 1: Resultado do ensaio com impulsos

Tensão aplicada	Fe-Si			Hy50		
	I [A]	B [T]	H [A/m]	I [A]	B [T]	H [A/m]
10	6	0,31	3060	7,6	0,12	3876
15	10	0,47	5100	12,7	0,20	6477
20	13	0,64	6630	17,4	0,28	8874
25	20	0,94	10200	21	0,29	10710
30	25	1,021	12750	22,5	0,37	11475
35	29	1,09	14790	30	0,44	15300
40	34	1,09	17340	32	0,46	16320
45	40	1,14	20400	39	0,49	19890
50	44	1,21	22440	44	0,54	22440
60	54	1,22	27540	52	0,58	26520
70	62	1,26	31620	60	0,67	30600
100	92	1,46	46920	91,2	0,74	46512

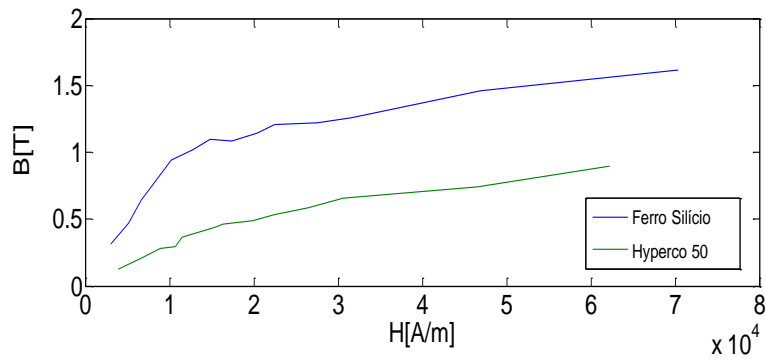


Fig.3. 9: Curva BH da região positiva do Fe-Si e Hy50

Com os resultados obtidos, procurou-se perceber o porquê da curva de magnetização obtida para o material Hy50 quando se sabe este pode alcançar 2T ainda antes da saturação magnética. Sendo que, na Fig.3. 9, essa diferença deve-se ao facto de o material não ter tido os tratamentos necessários para a sua finalização. Com a realização de revisão bibliográfica verificou-se que as laminas não possuíam a cozedura necessária. Para se atingir as propriedades desejadas do material ter-se-ia de realizar uma cozedura do material a uma temperatura de 865°C por 4 horas em hidrogénio seco e seguido de um arrefecimento a uma taxa de 85°C/h até a temperatura ambiente [17].

Segundo trabalhos de investigação recentemente publicados sobre as propriedades magnéticas e mecânicas de chapas laminadas feitas de material Hy50 [54], [55], estas devem ser sujeitas a um tratamento térmico antes do seu uso final. Este consiste em fazer um recozimento (“anulamento”) das chapas geralmente em um ambiente a vácuo de forma a prevenir oxidação das mesmas, assim como a uma temperatura que proporcione uma combinação adequada de propriedades mecânicas e magnéticas para suportar elevados gradientes de tensão mecânica. Ambas as publicações recomendam o tratamento térmico em lote e em um forno hermético. As chapas laminadas devem ser completamente desengorduradas (usando acetona, por exemplo) antes do tratamento térmico, podendo ainda serem empilhadas e separadas por um material isolante.

Resultados experimentais, foram inicialmente obtidos pela força aérea americana [56], [57] utilizando uma atmosfera de recozimento de hidrogénio (H₂) seco para minimizar a contaminação por oxigénio das peças. A Fig.3. 10, ilustra o processo de recozimento efetuado. Recozeram-se as peças a 850°C por 3 horas em Hidrogénio seco, resfriando-se o material a uma taxa de 100-190°C por hora até atingir 316°C, após o que qualquer taxa de resfriamento pode ser empregue.

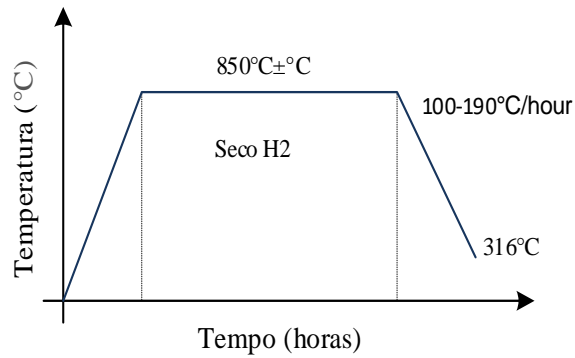


Fig.3. 10: Parâmetros de recozimento antes e depois da laminação a frio, sendo esta figura adaptada de acordo com o da referência [56].

A Fig.3. 11 mostra os resultados obtidos aquando da caracterização magnética em corrente contínua do material Hy50. A Fig.3. 11 a) mostra a curva de magnetização $B-H$ obtida, na qual são indicados dois pontos de operação importantes: ponto (A) localizado no “joelho” da curva $B-H$ (garantia de uma densidade de energia máxima), e um segundo ponto (B) que define um valor limite para a saturação magnética. A Fig.3. 11 b) mostra a evolução da permeabilidade magnética em função do campo magnético H .

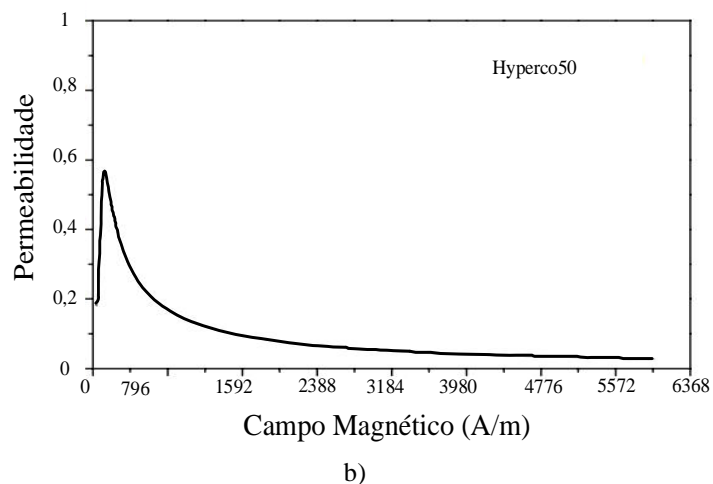
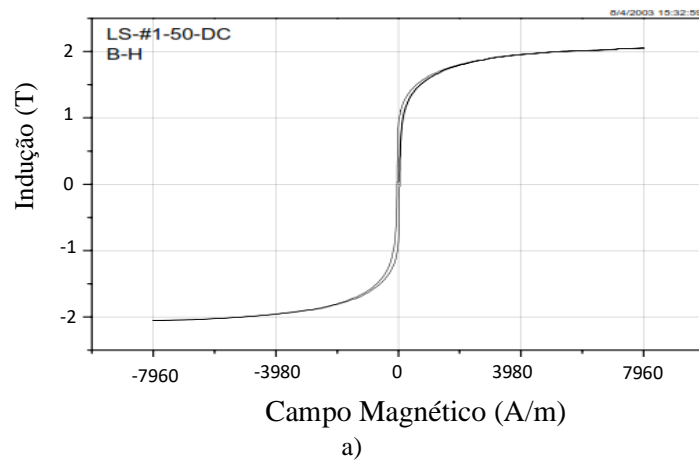


Fig.3. 11: a) - curva de Histereses e b) - da permeabilidade da liga de Hyperco50.

A Fig.3. 12 mostra os resultados obtidos para as perdas por efeito Joule do material Hy50 quando submetido a um campo de indução alternado sinusoidal. Os resultados foram obtidos para as seguintes frequências: 50, 100, 200, e 300Hz na Fig.3. 12 a) e de 400, 500, 700, a 1000Hz na Fig.3. 12 b). Verifica-se em todas as figuras que, independente da frequência, assim que o campo de indução passa o valor associado ao “joelho” da curva B-H, o qual se situa em torno de 1.5 Fig.3. 11 a), a densidade de perdas aumenta de forma exponencial pois o material está a entrar na região da saturação magnética.

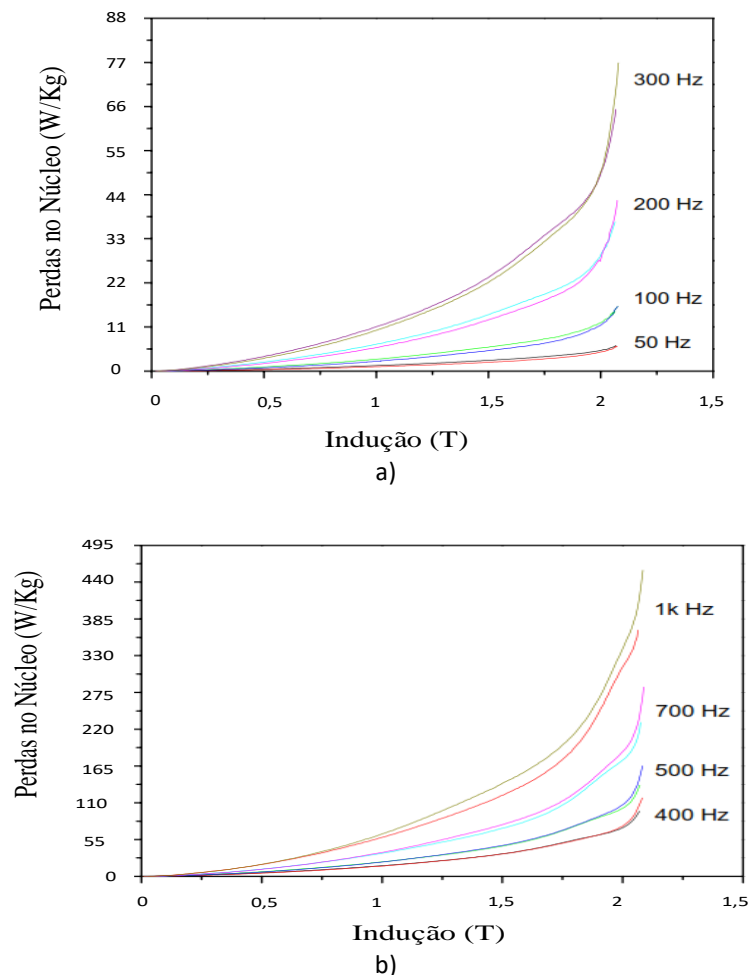


Fig.3. 12: Perdas no núcleo de valores de frequências do Hy50: a) - 50, 100, 200 e 300 Hz; b) - 50, 400, 500 e 700 e 1K Hz.

Os resultados obtidos anteriormente tiveram um processo de recozimento do material Hy50 a uma certa temperatura e durante um determinado intervalo de tempo, até um determinado valor para o gradiente de arrefecimento, assim como a escolha do processo mecânico de corte das peças, estampadas a uma certa pressão. Trabalhos recentes, mostram que o valor da temperatura de recozimento do material Hy50 deve estar a 871°C [58], sendo que, essas propriedades magnéticas melhoram enquanto da diminuição da resistência. Essa aplicação, dependerá particularmente das suas especificações [59], verificando-se assim um compromisso desejado entre as propriedades magnéticas e mecânicas.

3.1.4. Ensaio Experimentais para Determinação das Perdas no Núcleo Magnético

Para a determinação das perdas no núcleo magnético de material Hy50 foram realizados ensaios experimentais aos circuitos magnéticos desenvolvidos. Para tais, aplicaram-se tensões alternadas sinusoidais ao primário do circuito, mantendo o secundário em vazio. Para os primeiros testes, determinou-se o valor das perdas no núcleo através do balanço de potência, (3. 11) para vários valores de corrente e tensão aplicadas.

Os resultados obtidos estão listados na Tabela 3.2 e Tabela 3.3 para o circuito de Fe-Si e de Hy50, respectivamente. Nas tabelas estão listados os valores eficazes da tensão U , e da corrente I , e os valores medidos das potências ativas, reativas e aparente, P , Q e S , respectivamente, o fator potência, $\cos(\varphi)$ e os valores das perdas no cobre, no núcleo e totais, P_{cu} , P_{fe} e P_T , respectivamente. Apresentam-se ainda os valores da densidade de perdas no núcleo em [W/kg].

Tabela 3.2: Resultados do ensaio em regime AC do Fe-Si.

No primário		Potencias			$\cos(\varphi)$	Perdas			
Tensão	corrente	P	Q	S		P _{cu}	P _{ef}	P _{ef}	P _t
V _{ef} [V]	I _{ef} [V]	[W]	[Var]	[VA]		[W]	[W]	[W/kg]	[W]
12,2	6,29	40,7	62,9	74,6	0,54	27,7	13,0	40,9	40,7
7,3	3,52	10,6	23,4	25,7	0,42	8,7	1,9	6,1	10,6
5,9	2,78	6,9	15	16,6	0,42	5,4	1,5	4,7	6,9
5,1	2,34	5	10,8	11,9	0,42	3,8	1,2	3,7	5
4,4	2,1	3,8	8,3	9,1	0,42	3,1	0,7	2,2	3,8
3,6	1,7	2,7	5,4	6	0,45	2,0	0,7	2,1	2,7
2,9	1,35	1,8	3,5	3,9	-	1,3	0,5	1,6	1,8
2,1	0,97	0,8	1,8	2	-	0,7	0,1	0,4	0,8
0,3	0,15	0	0	0	-	0,0	0,0	0,0	0

Tabela 3.3: Resultados do ensaio em regime AC do Hy50

No primário		Potencias					Perdas			
Tensão	corrente									
Vef [V]	Ief [V]	P [W]	Q [Var]	S [VA]	cos (φ)	Pcu [W]	Pfe [W]	Pfe [W/kg]	Pr [W]	
7,1	6,4	42,9	13,1	44,5	0,96	28,7	14,2	44,7	42,9	
5,8	5,03	27,9	8,3	29	0,96	17,7	10,2	32,0	27,9	
5,1	4,81	23,4	7,6	24,6	0,95	16,2	7,2	22,7	23,4	
4,5	4,45	18,7	6,5	19,8	0,94	13,9	4,8	15,2	18,7	
3,7	3,79	13	4,7	13,9	0,94	10,1	2,9	9,3	13	
2,8	3,01	7,8	2,9	8,3	0,94	6,3	1,5	4,6	7,8	
2,4	2,65	5,9	2,2	6,3	0,92	4,9	1,0	3,1	5,9	
0,1	0,16	0	0	0	-	0,0	0,0	-0,1	0	

Dos resultados experimentais, o primeiro aspeto a salientar é o facto dos materiais apresentarem valores de perdas no núcleo semelhantes para valores de campo magnético semelhantes, ou seja, valores de corrente semelhantes. Como exemplo, pode-se verificar que para uma corrente próxima de 6.3A as perdas no núcleo são cerca de 44.7W/kg para a liga de Hy50 e 40.9W/kg para o Fe-Si, Fig.3. 13.

Dos mesmos resultados, verifica-se que os valores de corrente não são obtidos com os mesmos valores de tensão. Os valores de corrente são atingidos com valores de tensão mais baixos no circuito do material Hy50 do que no do Fe-Si, Fig.3. 13. Como os enrolamentos de ambos circuitos são semelhantes, esta diferença dever-se-á aos diferentes valores do coeficiente de indução. Como os coeficientes de indução são proporcionais à permeabilidade magnética do material, maiores valores de tensão indicam maiores valores de coeficientes de indução, por sua vez, maiores valores de permeabilidade magnética. Assim, este resultado veio confirmar os valores obtidos nos ensaios anteriores para as curvas BH , onde o material Hy50 apresentou valores de campo B inferiores ao do Fe-Si.

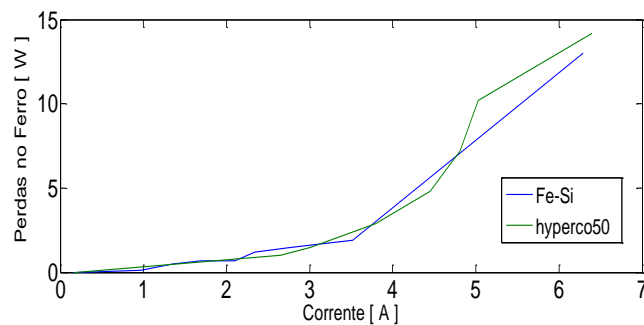


Fig.3. 13: Evolução das perdas no ferro em função da corrente do Fe-Si e o Hy50.

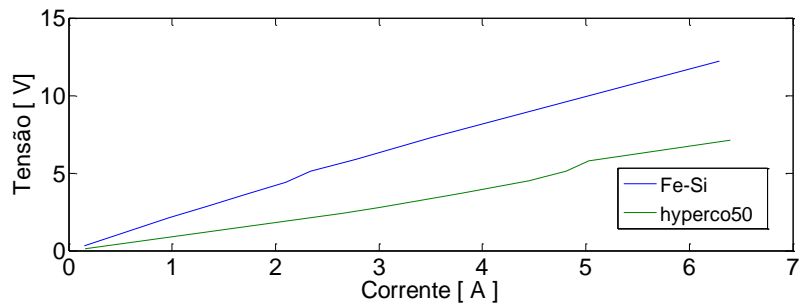


Fig.3. 14: Evolução da Tensão em função da Corrente do Fe-Si e o Hy50.

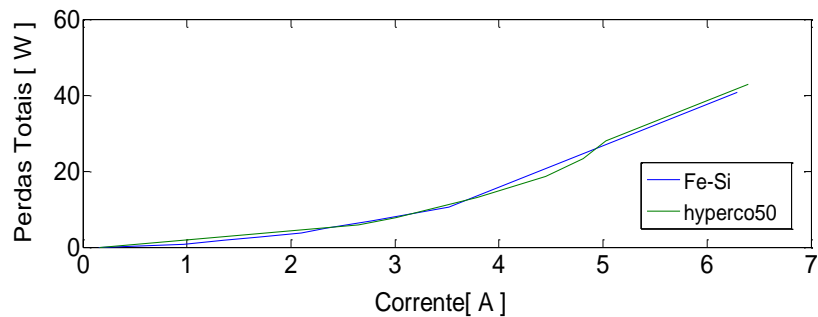


Fig.3. 15: Evolução das perdas totais em função da corrente do Fe-Si e o Hy50.

Para confirmar os resultados obtidos através do balanço de potências realizou-se um segundo ensaio, agora medindo o valor de fluxo no núcleo e calculando os respectivos valores de perdas no núcleo através da curva $B-H$. Para a realização deste ensaio, utilizou-se um segundo circuito "E-I" de maiores dimensões de Fe-Si, do qual, é já conhecido a curva BH do material na Fig.3. 16. O mesmo tipo de ensaio foi realizado no novo circuito magnético: aplicação de uma tensão alternada sinusoidal no primário do circuito, mantendo o secundário em vazio.

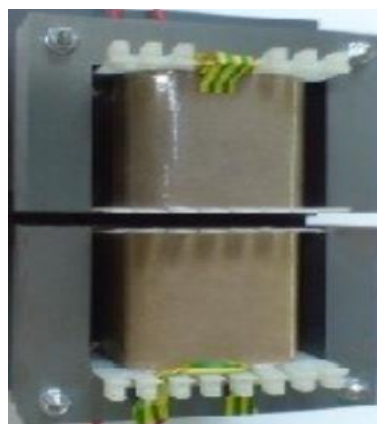


Fig.3. 16: Transformador de maior dimensão do núcleo do Fe-Si.

A Fig.3. 17 apresenta os resultados experimentais das curvas de corrente e tensão ao longo do tempo para o novo circuito “E-I” de Fe-Si. Através destas curvas, foi possível calcular os valores de campo B e H e traçar a respectiva curva, como se vê na Fig.3. 18 a). Na Fig.3. 18 b), e comparam-se os valores experimentais obtidos com a curva teórica do material.

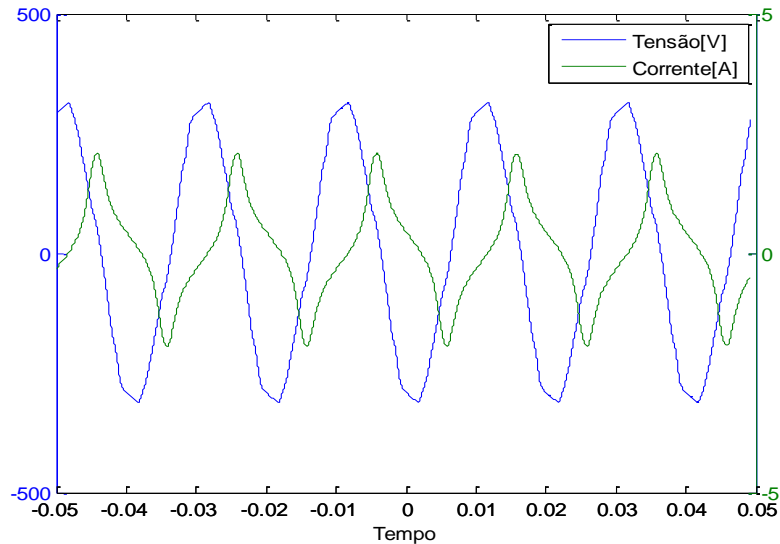


Fig.3. 17: Curva de Tensão e Corrente do Material Ferro Silício

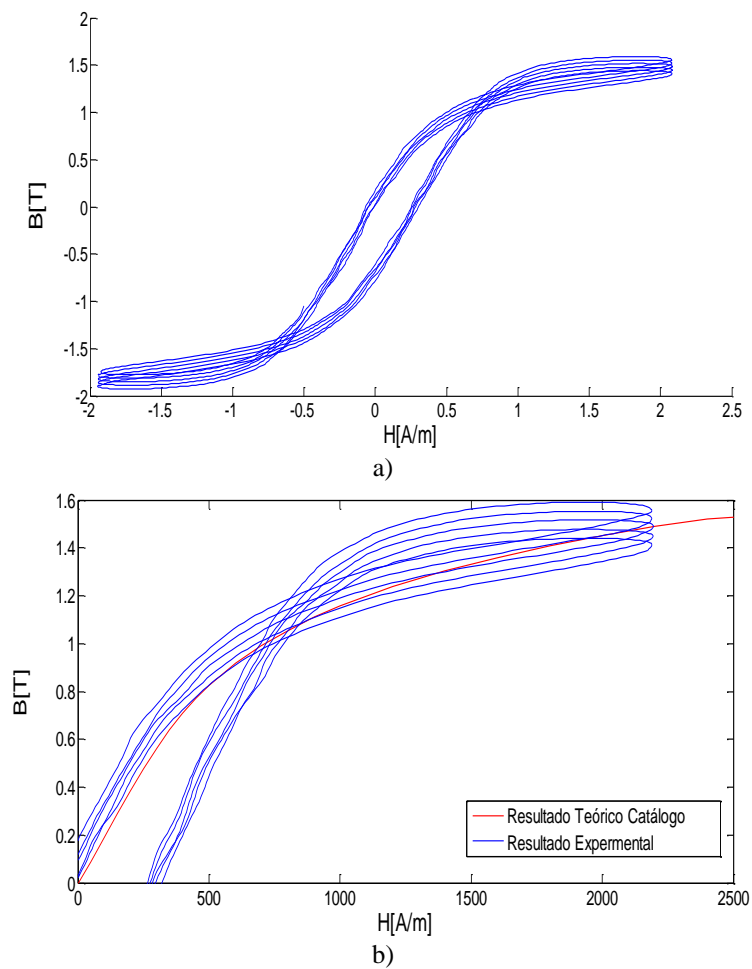


Fig.3. 18: a) - Curva de Histerese; b) - Comparação experimentais com resultado do teórico de catálogo.

Através dos resultados obtidos é possível calcular a área da energia magnética perdida em cada ciclo e através dela, calcular as perdas no núcleo de Fe-Si. Usando uma aproximação da área de energia magnética perdida por ciclo na Fig.3. 19, resultou um valor de perdas no núcleo de 18.03W.

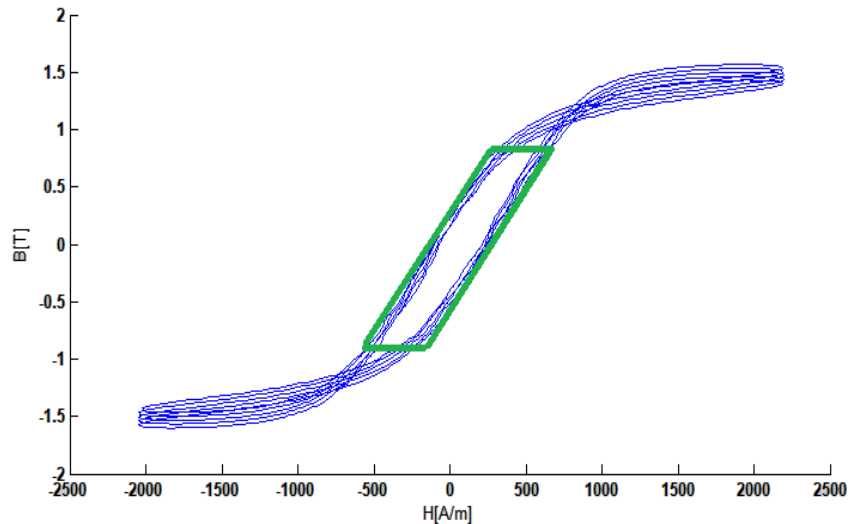


Fig.3. 19: Curva de Hysteresis por obtenção do fluxo e corrente

Na Tabela 3. 4 apresentam-se os valores das perdas obtidos experimentalmente para o Fe-Si. Com estes resultados foi possível comparar com os resultados de catálogo, com intuito de se verificar as propriedades magnéticas, comparando os valores de densidade de potência no núcleo apresentados na Tabela 3. 4, com os resultados de catálogo apresentados na Tabela 3. 5: Resultados de Catálogo é possível verificar o modelo específico que corresponde a liga utilizada (M400-50A).

Tabela 3. 4: Resultados Experimentais de ensaio em regime AC.

d [kg/m ³]	V [m ³]	P [kg]	Pfe [W]	Pcu [W]	Pfe [W/kg]	PT [W]
7,6x10 ⁺³	7.13x10 ⁻⁴	5.42	18.03	4.44	3.33	22.47

Tabela 3. 5: Resultados de Catálogo.

Designação Padrão	s	ρ	Perda máxima do núcleo AT		
	[mm]	[kg/m ³]	50Hz; 1.5T W/kg	50Hz; 1.0T W/kg	60Hz; 1.5T W/lb
M270-35A	0.35	7.65	2.70	1.10	1.55
M300-35A	0.35	7.65	3.00	1.20	1.72
M400-50A	0.50	7.70	4	1.7	2.3
M470-50A	0.50	7.70	4.70	2	2.70
M530-50A	0.50	7.70	5.30	2.30	3.05

3.1.5. Comparação das Propriedades Magnéticas entre os Materiais

Na Tabela 3. 6 são apresentados os resultados da comparação dos dois circuitos, em termos de peso, densidade, volume e perdas. Para o mesmo valor de campo magnético, por exemplo, com uma corrente de 6.3A (Tabela 3.2 e Tabela 3.3), verifica-se que as perdas no núcleo possuem valores semelhantes.

Tabela 3. 6: Resultado entre o FS e HY

	P [kg]	ρ [kg/m ³]	V [m ³]	Pfe [W]	Pcu [W]	Pfe [W/kg]	P _T [W]
Fe-Si	0.318	7.6x10 ³	4.12x10 ⁻⁵	0.79	38.95	2.54	39.75
Hy50	0.313	8.11x10 ³	3.86x10 ⁻⁵	0.56	32.39	1.78	32.95

Porém, um aspeto necessário de se verificar é o nível das perdas no núcleo para diferentes valores de campo B. É importante verificar qual o valor das perdas caso o circuito seja dimensionado para o seu ponto de saturação magnético. Para isso, recorreu-se a uma simulação em elementos finitos com as curvas BH dos diferentes materiais, com as curvas BH da Fig.3. 20.

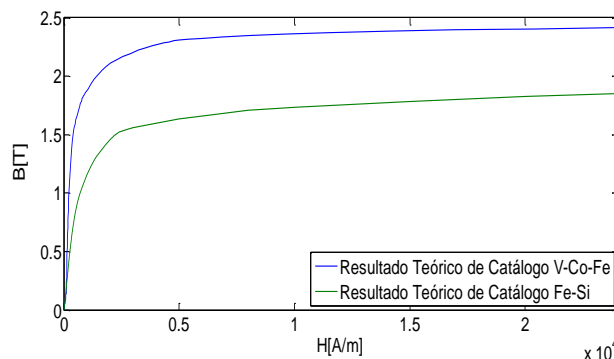


Fig.3. 20: Curvas B-H utilizadas na simulação dos materiais.

Na Tabela 3. 7, apresentam-se os valores de perdas no núcleo calculadas com base nos resultados de simulação. A corrente necessária para levar o material Hy50 ao seu ponto de saturação foi de 2A, sendo o seu ponto definido por um campo de indução magnético de 2.1 T. Para o circuito de Fe-Si o valor de corrente é 2.1A, para o ponto de funcionamento de 1.5T.

Os resultados de simulação da Tabela 3. 7 indicam que as perdas no núcleo do material Hy50 são cinco vezes superiores ao Fe-Si, devido aos superiores valores de campo B. Neste contexto, é necessário realizar uma análise mais detalhada da aplicação deste novo material em circuitos magnéticos: por um lado é possível obter maiores pontos de saturação, por outro, as perdas no ferro serão superiores. Assim, procedeu-se ao dimensionamento de dois transformadores de iguais dimensões, Fe-Si e o Hy50. Os resultados obtidos apresentam-se no capítulo seguinte.

Tabela 3. 7: Resultados Preliminares

	I [A]	μ_r	B_{sat} [T]	ρ [kg/m ³]	V [m ³]	Peso [kg]	m [kg]	Pcu [W]	P_{fe} [W] @ 50 [HZ]	P_{fe} [W/kg]	PT [W]
Hy50 do COMSOL	2	857. 9	2.1	8.11x10 ⁺³	7.13x 10 ⁻⁴	5.782	3.89	4.2	52.52	13.49	56.72
Fe-Si	2.1A	5000	1.5	7.6x10 ⁺³		5.422	5.42	4.44	18.03	3.33	22.47

3.2. Modelo Térmico em Parâmetros Concentrados

A construção de um modelo térmico em parâmetros concentrados (MTPC) permite a estimativa da temperatura do sistema desenvolvido sem recorrer a ferramentas de elementos finitos. Apesar da precisão do MTPC ser normalmente inferior àquela apresentada pelas ferramentas de elementos finitos, o MTPC é importante para o pré-dimensionamento de circuitos magnéticos, pois permite obter resultados rápidos com precisão suficiente.

Para a construção do MTPC reduziu-se a complexidade do circuito magnético apresentado em Fig.3. 21a) a um sistema cilíndrico de igual volume e materiais, Fig.3. 22b). O transformador contém diferentes camadas de materiais, cada um com sua própria resistência térmica e capacidade. Considerando apenas a propagação radial do calor, é possível criar um circuito elétrico equivalente para representar a dissipação do calor, Fig.3. 14. A equação que rege a propagação do calor em regime estacionário está descrita em (3. 13), na qual, T_{sup} e T_{amb} são as temperaturas de superfície e ambiente, P_j representas as

perdas por dissipação de calor nos materiais de cobre e ferro e R_{conv} corresponde à resistência térmica de convecção do calor. A resistência térmica de convecção está definida em (3. 2) onde h é o coeficiente de convecção e corresponde à superfície lateral do cilindro.

Note-se que as resistências térmicas de condução nos materiais de cobre e ferro não foram consideradas, pois apresentam valores muito inferiores quando comparadas com a resistência térmica de convecção. Estes valores são calculados e comparados na secção 3.2.1 com base na equação (3. 12), onde r_{int} , r_{ext} e l são os raios interiores e exteriores do base do cilindro e l é a sua altura e K_{th} corresponde à condutividade térmica do metal.

$$R_{cond;cu;fe} = \frac{l}{2\pi K_{th}l} \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) \quad (3. 12)$$

$$T_{sup} = R_{conv}P_J + T_{amb} \quad (3. 13)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hSup} \quad (3. 14)$$

O h é determinado por um processo iterativo devido a variável, Nu , que é o número nivelado de Nusselt dentro da geometria cilíndrica, (3. 16).

$$h = \frac{NuK}{D} \quad (3. 15)$$

$$Nu = \left[0,60 + \frac{[0.387(R_a)^{1/6}]}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right]^2 \quad (3. 16)$$

Os números de Prandtl e Grashof e o Rayleigh, podem ser calculados pelas seguintes equações (3. 17), (3. 18) e (3. 19), respetivamente.

$$R_a = GrPr \quad (3. 17)$$

$$Gr = \frac{D^3 \rho^2 g \Delta T}{\mu^2} \quad (3. 18)$$

$$Pr = \frac{\mu C_P}{K} \quad (3. 19)$$



Fig.3. 21: a) - Circuito magnético; b) - Aproximação do circuito magnético a um cilindro.

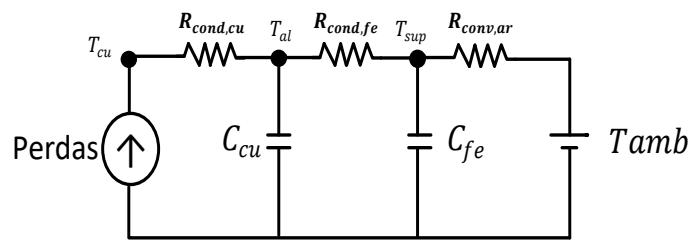


Fig.3. 22: Circuito equivalente térmico

Através das equações (3. 12) e (3. 14) determinaram-se os valores das resistências térmicas de convecção e de condução dos materiais de cobre e ferro, Tabela 3. 8. Como dito anteriormente, os valores das resistências térmicas de condução apresentam valores muito pequenos quando comparadas com as de convecção, podendo estas ser desprezadas para o cálculo do transito de calor. Com base no esquema equivalente apresentado na Fig.3. 22 calcularam-se os valores de temperatura atingidos pelos circuitos magnéticos nos diferentes pontos de saturação dos materiais de Fe-Si e Hy50, Tabela 3. 9. Estes valores correspondem aos valores de corrente de 2.1A e 2.0A para o Fe-Si e Hy50, respetivamente como descrito na Tabela 3. 7.

Observa-se que a temperatura da superfície do Hy50 é quase o triplo do valor da temperatura do circuito de Fe-Si, devido a grande diferença entre as perdas no ferro.

Tabela 3. 8: Resultado da resistência de condução

-	Raio [cm]	Resistência de Condução	
exterior	3.1	cobre	0.000233
interior	2.1	ferro	0.000339
-	Coeficiente de convecção h [W/m ² K]	Resistência de Convecção do Ar	
Hyperco	7.51	2.22	
Ferro Silício	5.49	3.04	

Tabela 3. 9: Resultado térmicos do MTPC

	R [m]	D=2R [m]	S [m ²]	P_{fe} [W] @ 50 [HZ]	P _{cu} [W]	T_{amb} [°C]	T_{sup} [°C]
Hy50	0.0234	0.047	0.06	52.54	4.2	20	117
Fe-Si				18.03	4.44		47.71

Estes valores vão ao encontro dos valores obtidos experimentalmente e por simulação. No entanto, foi realizado um ensaio experimental ao circuito magnético de Fe-Si com a corrente descrita na Tabela 3. 9. Na figura seguinte apresenta-se a evolução da temperatura à superfície do circuito durante o ensaio experimental. A temperatura começa a estabilizar perto dos 44°C depois de 1 hora e 20 minutos. Este valor vai ao encontro dos valores obtidos através do MTPC.

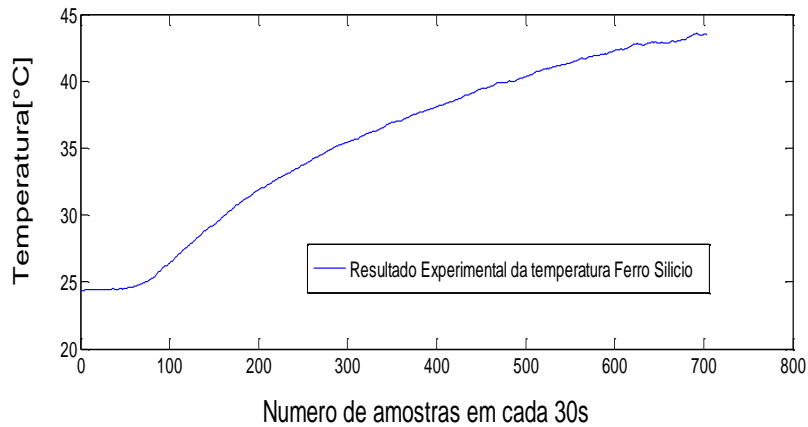


Fig.3. 23: Temperatura do Ferro Silício obtido experimentalmente

3.3. Simulação em Elementos Finitos

De forma a desenvolver um modelo mais detalhado do circuito magnético é possível obter resultados mais pormenorizados do perfil de temperatura, através de um modelo em elementos finitos do circuito magnético. Com base na ferramenta de elementos finitos COMSOL, obteve-se os seguintes resultados, para os diferentes circuitos magnéticos, Fig.3. 24.

Com os resultados numéricos, verifica-se que o nível de temperatura atingido pelo circuito magnético com o material Hy50 e Fe-Si vão ao encontro do que era esperado através do MTPC e dos resultados experimentais, Fig.3. 24.

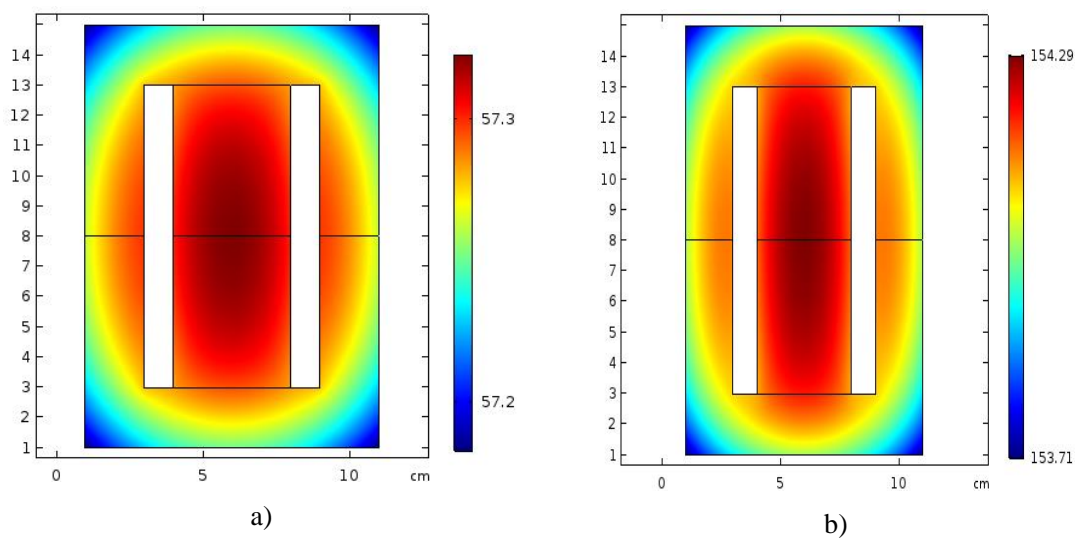


Fig.3. 24: Temperatura no a) Ferro Silício e b) Hyperco.

Na Tabela 3. 10, os resultados estão na ordem de grandeza. Sendo que, esses resultados vão de encontro ao valor obtido experimentalmente.

Tabela 3. 10: Comparação do resultado térmicos de simulação

	Experimental	Modelo MTPC	Elementos finitos
	[°C]		
Hy50	-	117.0	154.3
Fe-Si	45	47.7	57.3

4. Pré-Dimensionamento de um Transformador com liga de Hy50

O trabalho realizado neste capítulo visa o pré-dimensionamento de transformadores monofásicos com as diferentes ligas de Fe-Si e Hy50. O intuito deste trabalho é comparar o desempenho elétrico e térmico dos transformadores de cada liga de material. O pré-dimensionamento considera os resultados obtidos por simulação. Para o comportamento magnético do circuito é desenvolvido um modelo elétrico em parâmetros concentrados para o seu comportamento elétrico. O acoplamento eletromagnético é considerado no pré-dimensionamento e considerou-se o número de espiras do primário e secundário igual ($N_1 = N_2 = N$) e como consequência a relação de transformação $v = 1$.

4.1. Circuito Elétrico Equivalente do Transformador Monofásico

Para efeitos do estudo do comportamento elétrico do transformador monofásico foi desenvolvido um sistema de equações, baseado em parâmetros concentrados. Este sistema de equações foi desenvolvido com base na lei geral de indução, aplicada aos enrolamentos primário e secundário do transformador, pela equação (4. 1). Considera-se u_1 , u_2 , i_1 e i_2 as tensões e correntes do primário e secundário do transformador, R_1 e R_2 as resistências dos respectivos enrolamentos e ψ_1 e ψ_2 os fluxos ligados aos mesmos.

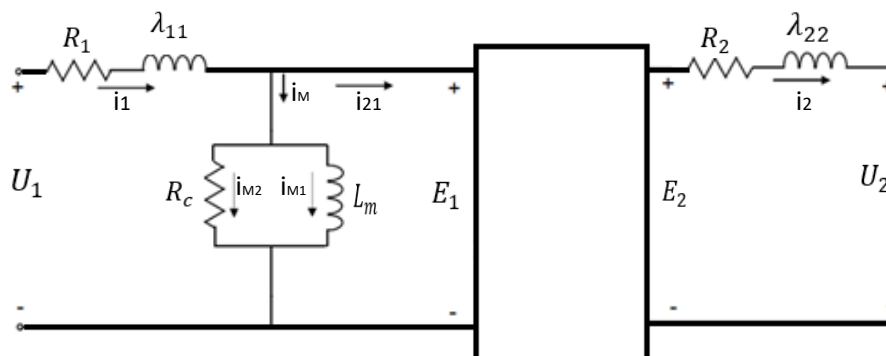


Fig-4. 1: Circuito equivalente do transformador

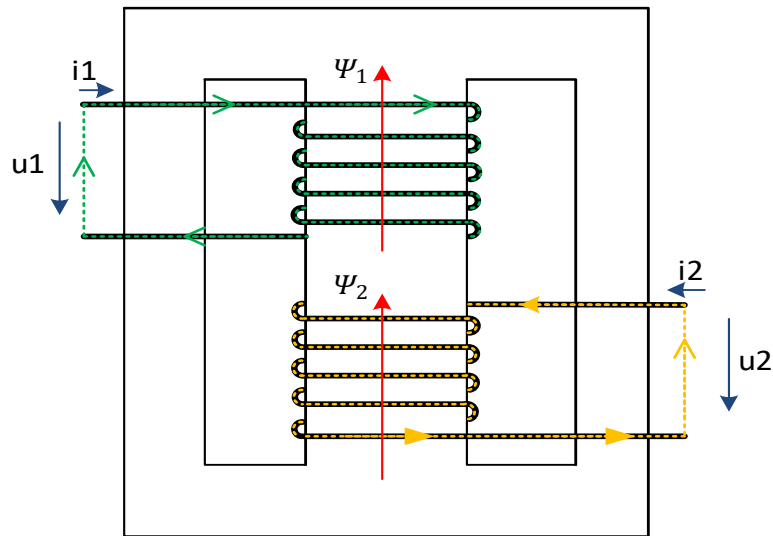


Fig-4. 2: Circuito monofasico do transformador

$$\begin{cases} u_1(t) = R_1 i_1(t) + \frac{d\Psi_1(t)}{dt} \\ -u_2(t) = R_2 i_2(t) + \frac{d\Psi_2(t)}{dt} \end{cases} \quad (4.1)$$

Os fluxos totais ligados com o primário e secundário, podem ser calculados através do número de espiras de cada enrolamento e pelo fluxo que os atravessa, (4. 2). Neste circuito é considerada a dispersão magnética, ou seja, os fluxos Ψ_1 e Ψ_2 não são iguais, ou seja, a ligação magnética entre os enrolamentos não é perfeita.

$$\begin{cases} \Psi_1(t) = \Psi_{1p}(t) + \Psi_{1\lambda}(t) = N\phi_N(t) + \Psi_{1\lambda}(t) \\ \Psi_2(t) = \Psi_{2p}(t) + \Psi_{2\lambda}(t) = N\phi_N(t) + \Psi_{2\lambda}(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

Nota: a partir de agora os termos em função de (t), como por exemplo $u_1(t)$ e $\phi_1(t)$, passarão a ser apenas descritos pela sua letra, ou seja u_1 e ϕ_1 .

Devido à simetria do circuito, o circuito magnético equivalente visto aos terminais de cada enrolamento é igual, resultando num valor igual de coeficientes de indução (4.3), e como $l_{11} = l_{22} = vL_M$ resulta em $l_{11} = L_M$.

$$\begin{cases} L_M = L_{12} = L_{21} = l_{11} = l_{22} \\ L_{11} = L_{22} \\ \lambda_{11} = \lambda_{22} \end{cases} \quad (4.3)$$

A determinação destes coeficientes é feita recorrendo aos resultados de simulação de elementos finitos do circuito em 3D. Esta será realizada com base na definição dos coeficientes, (4.4).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{11} = \frac{d\Psi_1}{di_1} \Big|_{i_2=0}, L_{22} = \frac{d\Psi_2}{di_2} \Big|_{i_1=0} \\ L_M = \frac{d\Psi_1}{di_2} \Big|_{i_1=0} = \frac{d\Psi_2}{di_1} \Big|_{i_2=0} \\ \lambda_{11} = L_{11} - L_M \\ \lambda_{22} = L_{22} - L_M \end{array} \right. \quad (4.4)$$

4.2. Cálculo dos Coeficiente de Indução

Para a determinação dos coeficientes de indução do circuito, vários valores de correntes foram simulados através da ferramenta de elementos finitos, os circuitos magnéticos em 3D dos transformadores com as diferentes ligas magnéticas, Hy50 e o Fe-Si. As curvas de saturação dos diferentes materiais foram consideradas na simulação. A simulação foi realizada utilizando a geometria do circuito apresentada na Fig-4. 3. Foram realizadas simulações com o secundário em vazio, $i_2 = 0$ A, e para vários valores de corrente do primário, $i_1 \in [0 - 2,5]$ A. Note-se que quando o secundário está em vazio, a corrente do primário do transformador é igual à corrente de magnetização, $i_1 = i_m$, porque não existe corrente no secundário. Desta forma, será possível obter os valores dos coeficientes de indução em função da corrente de magnetização.

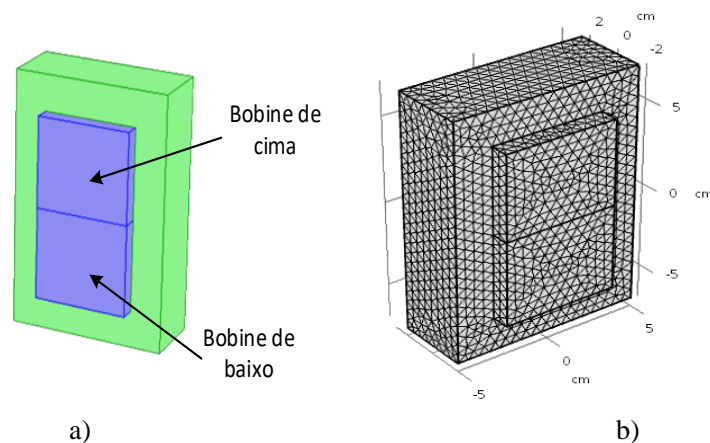


Fig-4. 3: a) Circuito 3D do COMSOL, b) Circuito 3D do COMSOL com a mesh

Na Fig-4. 4 apresentam-se os resultados dos fluxos médios que atravessam o primário e secundário do transformador em função da corrente de magnetização, i_m , para ambos os materiais Hy50 e Fe-Si. Nesta figura é possível visualizar os diferentes limites de saturação dos materiais, sendo o Hy50 superior ao do Fe-Si. No entanto, verifica-se que o ponto de saturação do Fe-Si ocorre com valores de corrente inferiores aos do Hy50. A diferença entre os fluxos dos enrolamentos resulta no cálculo dos coeficientes de dispersão magnética.

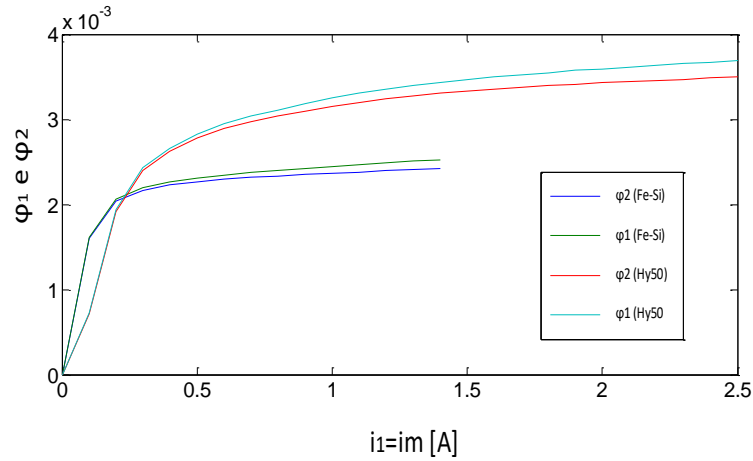


Fig-4. 4 : a) Fluxo total em uma seção média da bobina superior e inferior nos circuitos Fe-Si e Hy50.

Os resultados apresentados na Fig-4. 4, obtêm-se a evolução dos coeficientes de indução mútua e de dispersão com a corrente de magnetização através das equações (4.4). E com base nestes resultados, consegue-se determinar os resultados apresentado na Fig-4. 5, do coeficiente de indução mútua do Hy50, onde apresenta valores superiores aos do Fe-Si. Isto deve-se ao facto de os valores de fluxo no Hy50 serem superiores aos do Fe-Si (devido ao superior ponto de saturação).

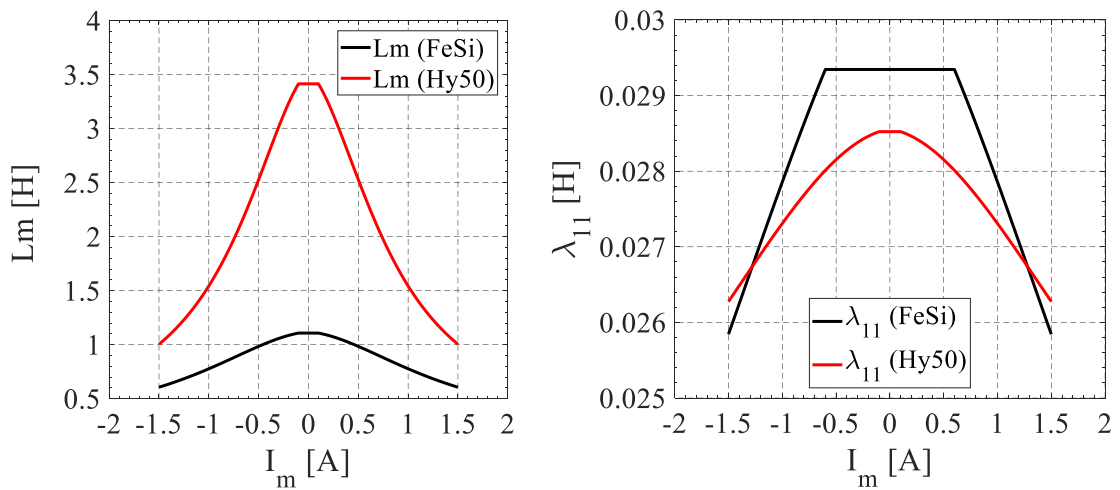


Fig-4. 5 : Coeficiente mútua e dispersão do circuito em Fe-Si e Hy50.

4.3. Desenvolvimento do Modelo em Simulink

O sistema de equações que representa o transformador monofásico (4.1) a (4.5), juntamente com a evolução dos coeficientes de indução com a corrente de magnetização, é um sistema não linear. Para o cálculo da solução do sistema, utilizou-se a ferramenta numérica Simulink. Com base nas equações atrás descritas e sabendo que será imposta a tensão no primário do transformador e a sua carga no secundário, desenvolveu-se um modelo por blocos.

Abaixo descrevem-se as equações constituintes de cada bloco e as respectivas equações base. Nesta primeira fase não se consideram as perdas no ferro do transformador. Estas serão adicionadas numa segunda fase.

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ -u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Psi_1 = \int (u_1 - R_1 i_1) dt \\ \Psi_2 = \int (-u_2 - R_2 i_2) dt \end{cases} \quad (4.5)$$

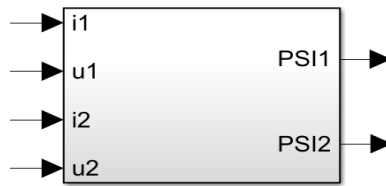


Fig-4. 6 : Bloco contendo as equações em (4.5).

$$\begin{cases} \Psi_1 = \Psi_{1p} + \Psi_{1\lambda} = N\phi_N + \lambda_{11}i_1 \\ \Psi_2 = \Psi_{2s} + \Psi_{2\lambda} = N\phi_N + \lambda_{22}i_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{\Psi_1 - N\phi_N}{\lambda_{11}(i_m)} \\ i_2 = \frac{\Psi_2 - N\phi_N}{\lambda_{22}(i_m)} \end{cases} \quad (4.6)$$

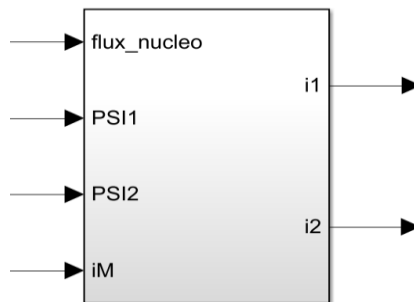


Fig-4. 7 : Bloco contendo as equações em (4.6).

$$i_M = i_1 + \frac{L_M}{l_{11}} i_2 = i_1 + i_2, \quad L_M = v l_{11} = l_{11} \quad (4.7)$$



Fig-4. 8 : Bloco contendo as equações em (4.7).

$$\begin{cases} \Psi_{1p} = N\phi_N = l_{11}i_1 + L_M i_2 = l_{11} \left(i_1 + \frac{L_m}{l_{11}} i_2 \right) = l_{11}(i_1)i_m \\ \Psi_{2p} = N\phi_N = l_{22}i_2 + L_M i_1 = l_{22} \left(i_2 + \frac{L_m}{l_{22}} i_1 \right) = l_{22}(i_2)i_m \end{cases} \Rightarrow \phi_N = \frac{l_{11}(i_1)i_m}{N} \quad (4.8)$$

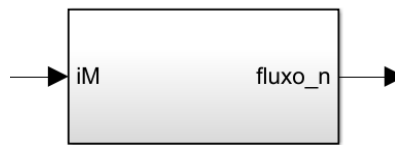


Fig-4. 9 : Bloco contendo as equações em (4.8).

Para a carga do transformador, foi considerada uma carga RL ligada aos terminais do secundário. Desta forma, resulta a última equação, a da carga:

$$u_2 = R_L i_2 + L_L \frac{di_2}{dt} \Rightarrow i_2 = \frac{1}{L_L} \int u_2 - R_L i_2 dt$$

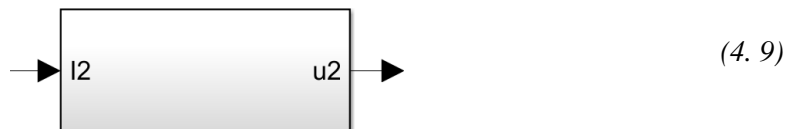


Fig-4. 10 : Bloco contendo as equações em (4.9).

Na figura seguinte mostra-se o modelo global do circuito do transformador monofásico, Fig-4. 11. Este circuito considera já a curva de saturação dos materiais, porém, ainda não considera as perdas no ferro.

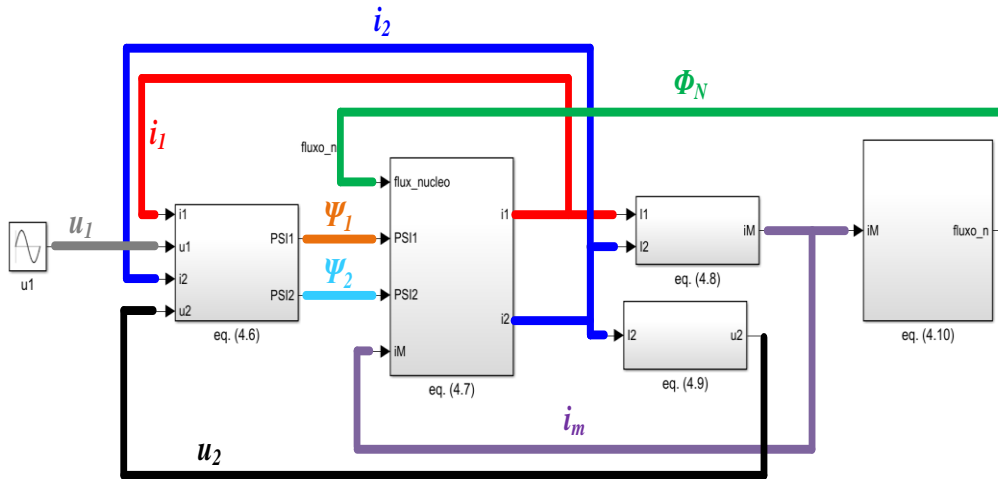


Fig-4. 11: Modelo do transformador monofásico sem perdas.

De forma a incluir as perdas no ferro irá completar-se o diagrama anterior. Serão apenas contabilizadas as perdas por histerese que tipicamente admite uma expressão semelhante à apresentada na (4. 10). Com base nos valores de catálogo apresentados no capítulo 3, Tabela 3. 7 é possível calcular o parâmetro K que relaciona o fluxo magnético no circuito e as perdas no ferro, equação. (4. 10).

$$P_{fe} = K' B_{fe}^2 f = K \Phi_N^2 f \quad (4. 10)$$

Por outro lado, o aparecimento destas perdas resulta num aumento de corrente no primário do transformador (considerando a sua tensão constante). A forma escolhida para a inclusão destas perdas no circuito foi a de adicionar ao ramo de magnetização uma resistência equivalente para as perdas no ferro. De forma a perceber melhor o que foi realizado é apresentado na Fig-4.14 o esquema equivalente do transformador sem perdas que apresenta o modelo apresentado na Fig-4.12.

Ao adicionar-se uma resistência, R_{fe} , em paralelo com o ramo de magnetização, I_{11} , a corrente de magnetização, I_m , é agora dividida em duas, I_{m1} e I_{m2} . Assim, é possível modificar o esquema apresentado na Fig-4.12 para se introduzir uma nova componente da corrente de magnetização, Fig-4.13.

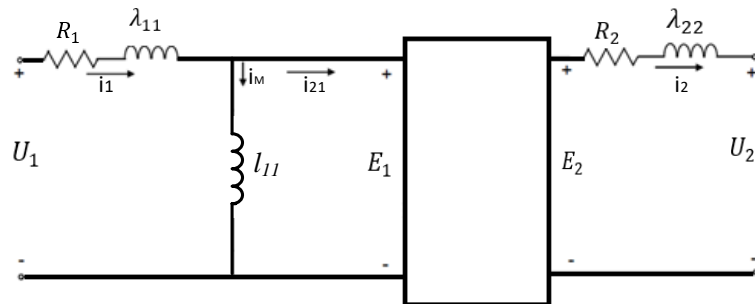


Fig-4. 12: Esquema equivalente do transformador monofásico sem perdas

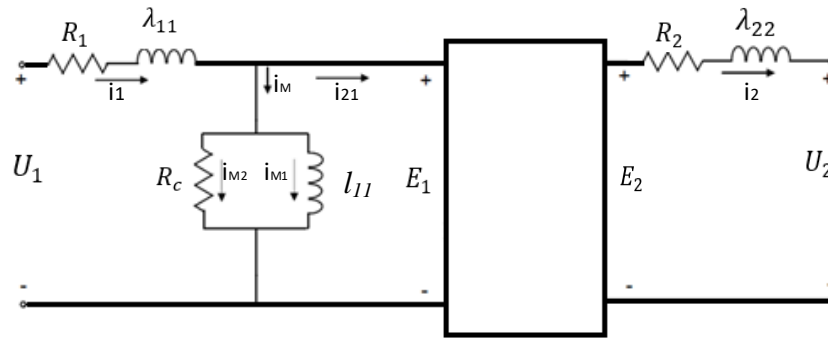


Fig-4. 13: Esquema equivalente do transformador monofásico com perdas.

As perdas no ferro podem ser calculadas a partir da tensão de magnetização e através da equação. (4.11). Desta forma a resistência que representa as perdas no ferro pode ser calculada pela equação. (4.12).

$$P_{fe} = \frac{U_m e f^2}{R_{fe}} \leftrightarrow R_{fe} = \frac{U_m e f^2}{P_{fe}} = \frac{U_m e f^2}{K \Phi_N^2} \quad (4.11)$$

Assim surgem três novas equações com a componente resistiva da corrente de magnetização, i_{m2} , a determinação da tensão de magnetização, U_m , e a componente reativa da corrente de magnetização, i_{m1} .

$$u_m = \frac{d\phi_N}{dt} \quad (4.12)$$

$$i_{m2} = \frac{u_m}{R_{fe}} \quad (4.13)$$

$$i_{m1} = i_m - i_{m2} \quad (4.14)$$

O novo esquema do modelo do transformador está apresentado na Fig-4. 14. Apenas foram acrescentados nos novos blocos das equações (4.12) a (4.14) e as ligações marcadas a tracejado.

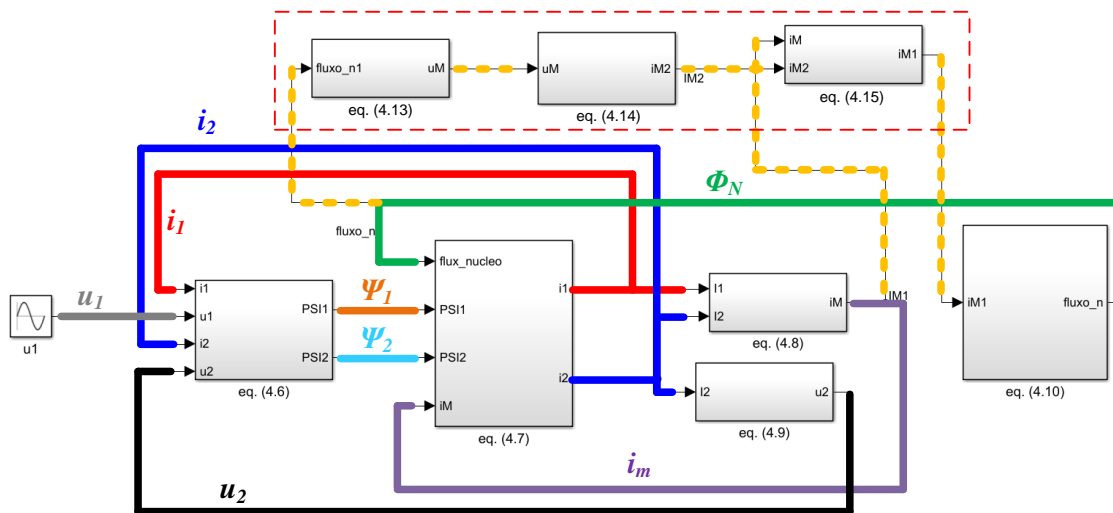


Fig-4. 14: Modelo do transformador monofásico com perdas.

4.4. Resultados de Simulação

4.4.1. Limitação à Temperatura

Com base no modelo desenvolvido e implementado em Simulink, obtiveram-se os resultados do ponto de funcionamento do transformador com os materiais Hy50 e Fe-Si, (apêndice C e D). Numa primeira simulação limitou-se a temperatura dos enrolamentos de cobre a 120°C, apêndice C. Os resultados de simulação indicam que, para a mesma temperatura, o transformador de Fe-Si possui uma maior potência específica e rendimento que o Hy50. Isto acontece porque as perdas no ferro do Hy50 são superiores aos do Fe-Si. Numa segunda simulação, não se limitou o circuito pela sua temperatura, mas sim aos seus pontos de saturação magnética, apêndice D. Como resultado, o Hy50 permitiu uma maior potência específica que o Fe-Si e rendimentos elétricos semelhantes.

Na Tabela 4. 1, apresentam-se as conclusões relativas aos ensaios atrás mencionados. Ao limitar-se pela temperatura, como o Hy50 tem mais perdas por histereses, o circuito com o Hy50 permite menos corrente e por isso a potência é ligeiramente inferior. Nota-se que o Hy50 não chega ao joelho da curva BH porque o $B < 2T$. Neste ponto, o Hy50 ainda permite aumentar o campo B, porém é necessário um sistema de arrefecimento auxiliar. Como se pode verificar, para ter ambos os circuitos no ponto de saturação, o Hy50 terá uma temperatura superior à do Fe-Si.

Desta forma a verificar o funcionamento do transformador nos pontos de saturação, obteve-se os resultados visto na Tabela 4. 1. Para o mesmo ponto de saturação, o transformador de Hy50 apresenta agora valores de potência superiores ao do Fe-Si, cerca de 933,3W de potência de saída (601,3W para o Fe-Si) e com rendimento de 93,2% (93,4% para o Fe-Si). Assim pode-se concluir que, para as mesmas dimensões do circuito magnético, é possível obter uma maior potência específica com o Hy50, porém é necessário um arrefecimento adicional para reduzir a temperatura de funcionamento.

Tabela 4. 1: Resultados de comparação, limitados na temperatura e no ponto de saturação do joelho, entre o Fe-Si e o Hy50.

	Resultados - limitando a temperatura do cobre a 120°C		Resultados - limitando ao ponto de saturação BH (Hyperco- 2T e FeSi - 1.4T)		unidades
	FeSi	Hy50	FeSi	Hy50	
U _s	300	320	300	410	V
R _L	60	80	60	80	Ω
η	93,4%	93,2%	93,4%	93,2%	%
P ₁	643,6	610,9	643,6	1001	W
P _{fe}	15,34	23,31	15,34	38,16	W
P _{cu}	26,87	18,19	26,87	29,87	W
P ₂	601,3	569,4	601,3	933,3	W
i _{1ef}	3,49	2,823	3,49	3,62	A
i _{2ef}	3,195	2,681	3,195	3,433	A
u _{1ef}	212,1	226,3	212,1	289,9	V
u _{2ef}	191,7	214,5	191,7	274,6	V
B _{ef}	0,98	1,08	0,98	1,383	T
B _{pico}	1,38	1,53	1,38	1,96	T
Lm _{eq}	0,906	3,2	0,906	3,032	H
T _{cu}	119,2	117,5	119,2	179,8	°C

5. Conclusões e Trabalhos Futuros.

5.1. Conclusões

Neste presente capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas nesta dissertação sobre o estudo do material Hy50 e a sua potencial aplicabilidade em circuitos magnéticos de máquinas elétricas. Este estudo foi baseado em ensaios laboratoriais, que permitiram a caracterização desta liga, nomeadamente na medição da curva BH das perdas por histereses e a sua temperatura.

Para obtenção da curva BH, realizaram-se ensaios laboratoriais a um circuito transformador com o secundário em vazio. Foram realizados testes com tensão alternada e testes com impulsos de corrente. Com os ensaios a tensão alternada não foi possível obter campos de indução magnética perto dos valores de saturação dos materiais, sendo necessária a realização de ensaios com impulsos de corrente. As perdas no ferro foram calculadas através de duas metodologias: 1) através do balanço de potência no transformador e 2) através da área interior à curva de histerese, que corresponde à energia dissipada por ciclo de histerese. Ao comparar a curva do material Fe-Si com a do Hy50, verificou-se a curva para o Hy50 era inferior à do Fe-Si, resultado este que não era esperado. Este comportamento inesperado do material Hy50 foi devido ao material não ter tido os tratamentos adequados para a sua finalização. Para a obtenção de uma melhor finalização, o material deveria ter recebido uma cozedura final a 865°C por 4 horas em hidrogénio seco e seguida de um arrefecimento a uma taxa de 85°C/h até a temperatura ambiente.

No entanto, para verificar o possível potencial da liga Hy50, com as características corretas, foram desenvolvidos modelos eletromagnético e térmico em parâmetros concentrados, que foram validados através de ferramentas de elementos finitos e por ensaios experimentais.

Depois de desenvolvidos os modelos em parâmetros concentrados avaliou-se a potencialidade do Hy50 através do dimensionamento de um transformador monofásico de Hy50 e Fe-Si. Através de uma ferramenta de elementos finitos foi simulado o circuito magnético do transformador em 3D, com as curvas teóricas dos materiais, e foram calculados os respetivos coeficientes de indução (próprios, mútuos e de fugas). Com os resultados dos coeficientes de indução obtidos, foi utilizado um circuito elétrico equivalente do transformador e foram testados vários pontos de funcionamento.

Como resultado, verificou-se que o Hy50 permite o aumento da potência específica do transformador, porém existem constrangimentos que têm de ser considerados. Se o ponto de funcionamento for limitado à temperatura de 120°C, o transformador de Fe-Si apresenta uma potência elétrica e rendimento elétrico superior ao circuito do Hy50. Isto acontece porque para a mesma intensidade de fluxo magnético as perdas no Hy50 são superiores ao do Fe-Si, aumentando a sua temperatura. Por outro lado, se a limitação do circuito não for a temperatura, mas sim o ponto no joelho da saturação, então o transformador de Hy50 permite um aumento da potência específica em cerca 55.5% (passa de 601W para 933W) com semelhante rendimento elétrico, porém a temperatura sobe de 120°C para 180°C.

Disto isto a liga de Hy50, apesar de possuir perdas de histereses superiores ao do Fe-Si e assim necessitar de um maior arrefecimento, o seu ponto de saturação superior permite uma maior densidade de potência que poderá ter um impacto importante no dimensionamento das máquinas elétricas.

5.2. Trabalho Futuro

Este trabalho mostrou que o Hyperco 50 possui um potencial importante para a sua incorporação em máquinas elétricas, devido ao seu alto ponto de saturação magnética. No entanto, o primeiro passo na continuação deste trabalho, deve ser obtido o material Hy50 devidamente tratado de forma a atingir as propriedades necessárias, nomeadamente, o seu alto ponto de saturação. Um estudo importante será obter relativamente de forma sistemática as zonas de potências em que o Hy50 passa, claramente a ter vantagens superiores ao Fe-Si e as zonas em que não será vantajoso.

Este processo sistemático poderá passar pela utilização de algoritmos de otimização com base nos modelos eletromagnético e térmico desenvolvidos. Será importante analisar as possíveis formas de arrefecimento adicional necessárias para a compensação das perdas por histereses superiores.

Com objetivo a longo prazo, será necessária a construção de um transformador otimizado com o material Hy50 para validação dos modelos desenvolvidos.

Referências

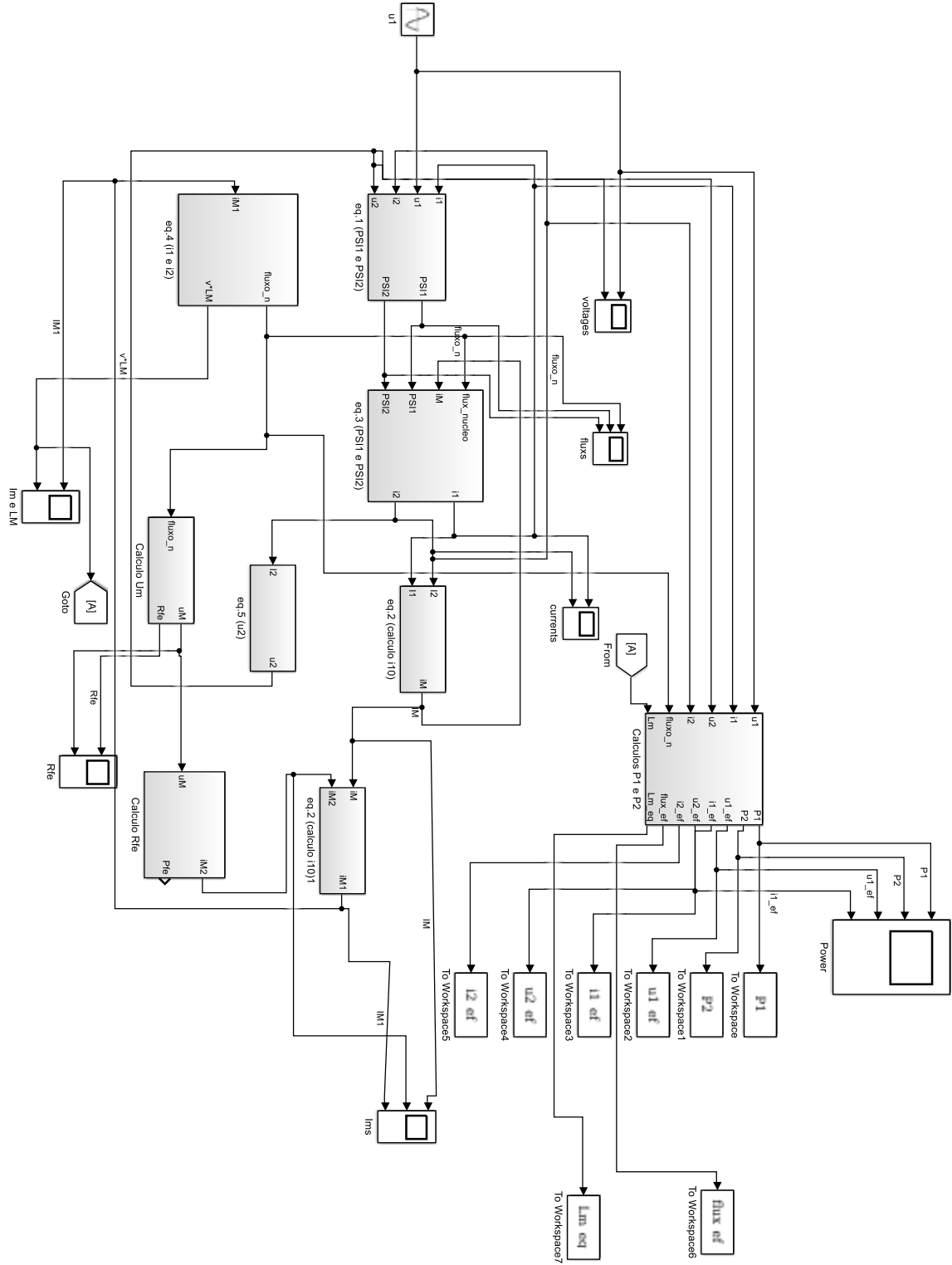
- [1]. ASTM A697/A697M, "Standard test method for alternating current magnetic properties of laminated core specimens using Voltmeter-ammeter-Wattmeter method", *ASTM* (2004), disponível em: <http://compass.astm.org/Standards/HYSTORICAL/A697A697M-03.htm>.
- [2]. Cartech.com. "Carpenter - CarTech® Hiperco® 50 Alloy". [online] Disponível em: <https://www.carttech.com/en/product-solutions/cartech-hiperco-50-alloy/> [Acedido a 2 Out. 2018].
- [3]. R.M. Bozorth, Ferromagnetism, "IronSilicon Alloys", *New York: IEEE Press*, vol 32,n.1, pp. 190–209. 1978.
- [4]. C.W. Chen, " Metallurgy and magnetic properties of an Fe-Co-V alloy", *Journal of Applied Physics*, vol. 69 n.3, pp.348, 1961.
- [5]. Q. Zhu, " An increase of structural order parameter in Fe–Co–V soft magnetic alloy after thermal aging ", *Applied Physics Letter*, vol. 69, 3917, 1998.
- [6]. D.W. Clegg and R.A. Buckley, "Order Transformation in Iron–Cobalt-Based Alloys", *Metal Science Journal*, vol 7, pp. 48-54 , 2018.
- [7]. A.W. Smith and R.D. RaWlings, *Phys*, "The homogeneity range and defect structure of the laves phase $NbFe_2$ ", *Status Solidi A*, vol 34, pp117 ,1976.
- [8]. M. RajkoVic and R.A. Buckley, "Ordering transformations in Fe-50Co based alloys ", *Metal Science Journal*, vol.15, pp21 ,1981.
- [9]. A.I.C. Persiano and R.D. RaWlings, "physica status solidi " *Status Solidi A*, vol. 103, pp.574, 1987.
- [10]. Q. Zhu, L. Li, M.S. Masteller, and G.J. Del Corso, " Microstructure and Hall–Petch Behavior of Fe–Co-based Hiperco© Alloysa)", *Applied Physics Letter*, vol.69, pp.25,1996.
- [11]. L. Li, J. . "Applications of Ferromagnetic and Optical Materials, Storage and Magnetoelectronics:", *Journal of Applied Physics*, vol.79, pp.4578 ,1996.
- [12]. D. SHyn, J. Degauque, C. Lebourg, and B. Astie, "Influence of Thermal Treatment on Magnetomechanical Damping of 49Fe-49Co-2V Alloy", *Journal De Physique IV Colloque*, vol.06, pp. C8-545,1996.
- [13]. Z. Turgut, M.Q. Huang, K. Gallagher, M.E. McHenry, and S.A. Majetich, *J. Appl*, "Magnetic properties and ordering in C-coated Fe_xCo_{1-x} alloy nanocrystals", *Phys*. Vol 81, pp.8, 1997.
- [14]. Y. Ustinovs HykoV, B. Pushkare V, I. Shabanova, and A. Ulinova, " Phase Transformations in the Fe-Co System ", *Interface Sci.*, vol.10, pp.311 ,2002.
- [15]. X.M. Cheng, X.K. Zhang, D.Z. Zhang, S.H. Lee, A. Duckham, T.P. Weihs, R.C. Cammarata, J.Q. Xiao, and C.L. Chein, J, "Preparation and characterization of MnZn-ferrite nanoparticles using reverse micelles ", *Applied Physics*, Vol.93, pp.7121 (2003).
- [16]. B.D. Cullity and C.D. Graham, "Introduction to Magnetic Materials", *Wiley IEEE Press*, n.2, pp. 466, 2009.

- [17]. Andreas Krings, "Magnetic Materials Used in Electrical Machines: A Comparison and Selection Guide for Early Machine Design", *IEEE Industrial Application Magazine*, vol. 23, n. 6, pp. 21-28, 2017.
- [18]. R. Hylzinger and W. RodeWald, "Magnetic Materials Fundamentals, Products, Properties, Applications". *Publicis Pub.*, Erlangen, Germany, 2013.
- [19]. Vacuumschmelze GmbH. "Soft magnetic materials and semi-finished products," product leaflet, Hanau, Germany, 2002.
- [20]. Sanchez-Giron, V., "Materiales Magneticos, Editorial Montecorvo", Trabalho de graduação, Madrid, 1965.
- [21]. Ojovan, M. I.; Lee, W. B. E. "Connectivity and glass transition in disordered oxide systems". *Journal of Non-Crystalline Solids*. 356 (44–49): 2534, 2010.
- [22]. H. GaVrila and V. Ionita, "Crystalline and amorphous soft magnetic materials and their applications—Status of art and challenges," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 4, n. 2, pp. 173–192, 2002.
- [23]. S. Derlecki, Z. Kusmierek, D. Maria, and J. SzulakoWski, "Magnetic properties of amorphous materials used as cores of electric machines," *Przegląd Elektrotechniczny* (Elect. Rev.), vol. 88, n. 12a, pp. 10–13, 2012.
- [24]. C. Jensen, F. Profumo, and T. Lipo, "A low-loss permanent-magnet brushless DC motor utilizing tape wound amorphous iron," *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 28, no. 3, pp. 646–651, 1992.
- [25]. D. Steiner PetroVíc, "Non-oriented electrical steel sheets," *Materials Technology*, vol. 44, n. 6, pp. 317–325, 2010.
- [26]. A. Schoppa and P. Delarbre, "Soft magnetic powder composites and potential applications in modern electric machines and devices," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 50, no. 4, pp. 1–4, 2014.
- [27]. L. Hultman and A. Jack, "Soft magnetic composites-materials and applications," in *Proc. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pp. 516–522, 2003.
- [28]. A. Jack, B. Mecrow, and P. Dickinson, "Iron loss in machines with powdered iron stators," in *Proc. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pp. 48–50, 1999.
- [29]. Y. Guo, J. G. Zhu, P. Watterson, and W. Wu, "Comparative study of 3-D flux electrical machines with soft magnetic composite cores," *IEEE Trans. Industrial Applications*, vol. 39, no. 6, pp. 1696–1703, 2003.
- [30]. João F. P. Fernandes; P. J. Costa Branco, "The Shell-like Spherical Induction Motor for Low-speed Traction: Electromagnetic Design, Analysis and Experimental Tests" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, n. 7, pp. 4325-4335, Julho 2016.
- [31]. BRANDÃO, D. L., "Introdução Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua", *Fundação Calouste Gulbenkian*, Lisboa (1984).

- [32]. Luís C. A. Pinho, "Materiais Magnéticos e suas Aplicações", dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [33]. MORA, J. F., "Máquinas Eléctricas", *McGraw Hill*, 3ª Edição, Espanha, 2003.
- [34]. M. Grande, R. Bidulsky, A. CaVagnino, L. Ferraris, and P. Ferraris, "Investigations on different processing conditions on soft magnetic composite material behavior at loW frequency," *IEEE Trans. Industrial Applications*, vol. 48, no. 4, pp. 1335–1343, 2012.
- [35]. A. Krings, M. Cossale, J. Soulard, A. Boglietti, and A. CaVagnino, "Manufacturing influence on the magnetic properties and iron losses in cobalt-iron stator cores for electrical macHynes," *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 5595–5601, 2014.
- [36]. R. Siebert, J. Schneider, and E. Beyer, "Laser cutting and mechanical cutting of electrical steels and its effect on the magnetic properties," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 50, n. 4, pp. 1–4, 2014.
- [37]. A. Krings, S. Nategh, O. Wallmark, and J. Soulard, "Influence of the Welding process on the performance of slotless PM motors With SiFe and Ni-Fe stator laminations," *IEEE Trans. Industrial Applications*, vol. 50, n. 1, pp. 296–306, 2014.
- [38]. G. Bertotti and I. Mayergoyz, "The Science of Hysteresis". *Academic Oxford*, U.K, 2006.
- [39]. C.-C. CHyang, A. Knight, M.-F. Hsieh, M.-G. Tsai, B. Liu, I.-G. Chen, Z.-L. Gaing, and M.-C. Tsai, "Effects of annealing on magnetic properties of electrical steel and performances of SRM after punchHyng," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, 2014.
- [40]. L. Mthombeni and P. Pillay, "Core losses in motor laminations exposed to High-frequency or nonsinusoidal excitation," *IEEE Trans. Industrial Applications*, vol. 40, no. 5, pp. 1325–1332, 2004.
- [41]. Z. Gmyrek, A. CaVagnino, and L. Ferraris, "Estimation of the magnetic properties of the damaged area resulting from the punchHyng process: Experimental research and FEM modeling," *IEEE Trans. Industrial Applications*, vol. 49, no. 5, pp. 2069–2077, 2013.
- [42]. P. Tixador, F. Simon, H. Daffix, M. Deleglise, "150-kW Experimental Superconducting Permanent-Magnet Motor", *IEEE. Trans. Applied Superconductivity.*, vol.9, n.2, Pp. 1205-1208, Junho 1999.
- [43]. Paulo R. S. Figueira, "Projeto e construção de um transformador de potência supercondutor", dissertação de mestrado, universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [44]. ASTM A773/A773M, "Standard test for direct current magnetic properties of loW coerciVity magnetic materials using Hysteresisgraphs", *ASTM* (2009), disponível em: http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi? A773+14.
- [45]. ASTM A927/A927M, "Standard test method for alternating current magnetic properties of toroidal core specimens using Voltmeter-ammeter-Wattmeter method", *ASTM* (2004), disponível em <http://compass.astm.org/Standards/HYSTORICAL/A927A92 7M-04.htm>.
- [46]. E.C. Jameson, "Electrical Discharge MacHyning", *Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn, MI, p. 12, 2001.

- [47]. K.H. Ho and S.T. NeWman, "Investigating the surface properties of EN-31 die-steel after machining with powder metallurgy EDM electrodes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol .43, pp.1287,2003.
- [48]. K.H. Ho, " State of the art in wire electrical discharge machining ", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.44, 1247 (2004).
- [49]. F. Alpeter and P. Perez, " Comprehensive Materials Finishing ", *Journal of Materials Processing Technology*. vol .149, pp.147, 2004.
- [50]. K.P. Rajurkar, M.M. Sundaram, and A.P. Malshe, "Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining", *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machyning (ISEM)*, vol. 6, pp. 13. 2013.
- [51]. J.F. Liu and Y.B. Guo, "Process Capability of wire-EDM of NiTi Shape Memory Alloy at Main Cut and Trim Cut Modes", *Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME, Procedia Manufacturing* , Vol. 1, pp. 914. 2015
- [52]. Y. Sakaki and S. Imagi," Relationship among eddy current loss, frequency, maximum flux density and a new parameter concerning the number of domain walls in polycrystalline and amorphous soft magnetic materials" *IEEE Transaction on Magnetics* ,Vol.17, pp.1478 ,1981.
- [53]. Y. Chen and P. Pillay , " An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation", *Proceedings of IEEE 37th IAS Annual Meeting (Pittsburg, PA)*, pp. 759., 2002
- [54]. TANJORE V. JAYARAMAN, "Effect of Processing of HYPERCO 50 Alloy Laminates on Their Magnetic Properties", *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, n. 11, pp 4379-7386, 2015.
- [55]. Meka, Vamsi M., Tanjore V. Jayaraman, and Eric M. Fitterling. "Effect of Temperature on the Magnetic Properties of CarTech Hypocore Alloy." *IEEE Magnetics Letters*, vol. 8, pp. 1-4, 2017.
- [56]. Liu, SHYqiang, "High-Performance, Soft Magnetic Laminates for Aerospace PoWer Systems", *Relatório da Universidade de Dayton Research Institute*, pp 39, 2004.
- [57]. Fingers, Richard T., Jack E. Coate, and Norman E. DoWling. "Mechanical properties of iron-cobalt alloys for power applications." *Energy Conversion Engineering Conference*, 1997. IECEC-97., *Proceedings of the 32nd Intersociety*. vol. 1, 1997.
- [58]. Horwath, john, zafer turgut, and richard fingers. "high temperature properties and aging-stress related changes of feco materials". *Defense technical Information Center*, pp.130, 2006.
- [59]. Montague, Gerald, et al. "Design and Fabrication of High-Temperature, Radial Magnetic Bearing for TurbomacHyner". *Nasa STI Program Office*, pp13,2003.

Apêndice A



Apêndice B

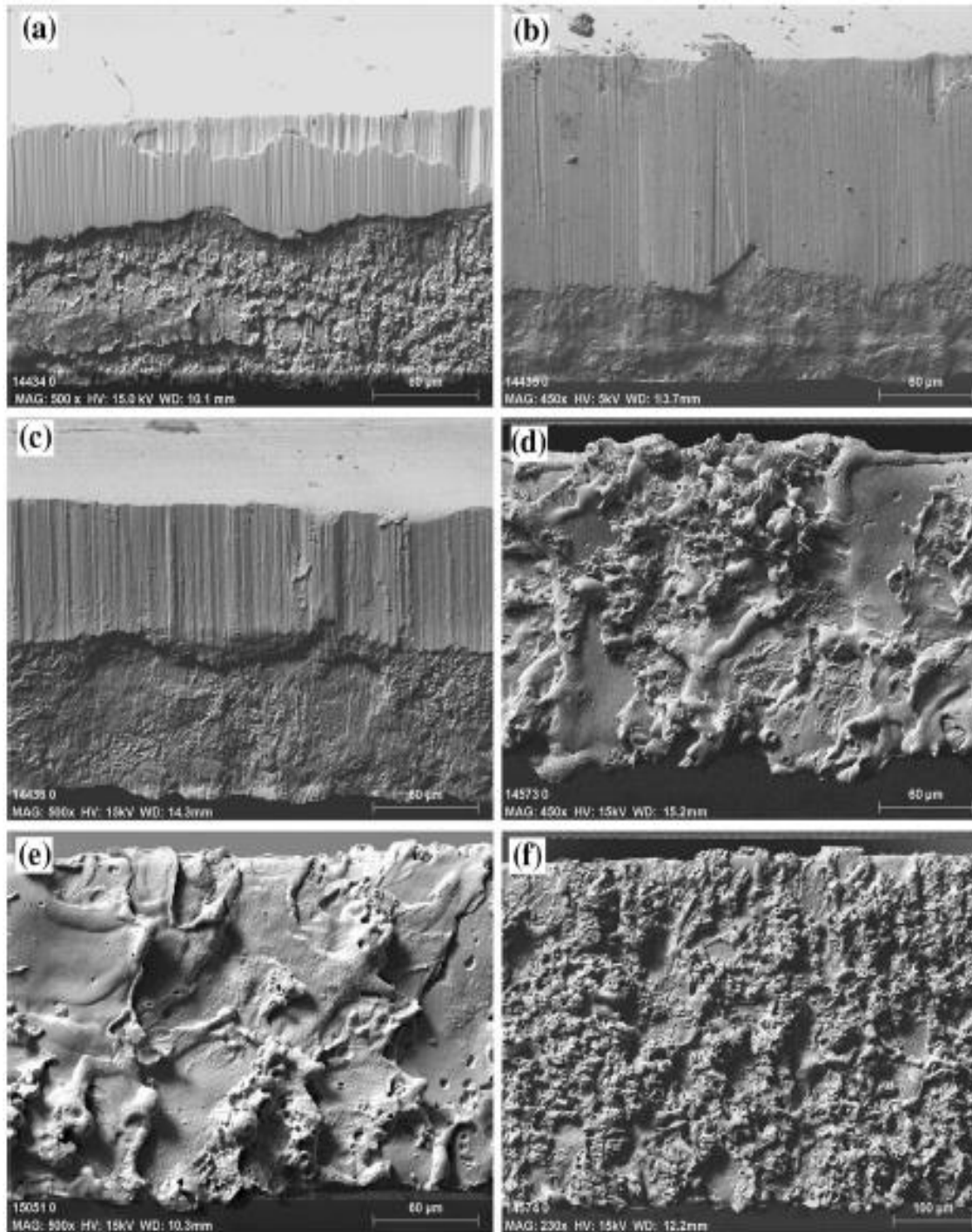


Fig-2. 13- Micrografias da borda de corte de HYPERCO 50: (a) ST, (b) STfA, (c) AfST, (d) ED, (e) EDfA, e (f) AfED.

Apêndice C

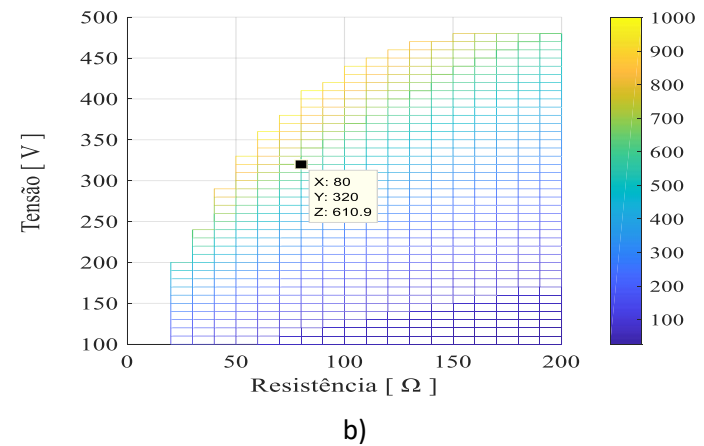
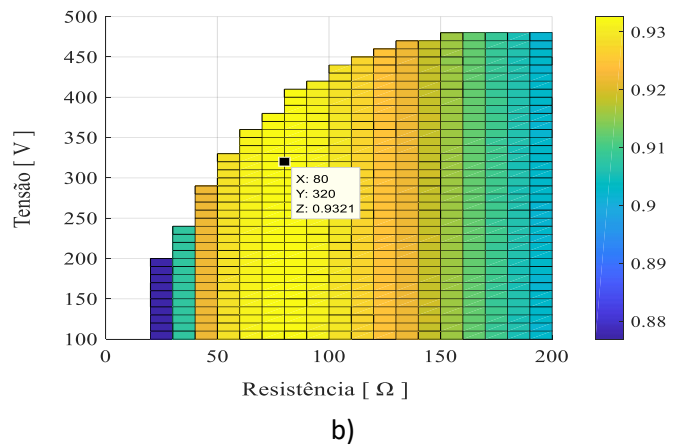
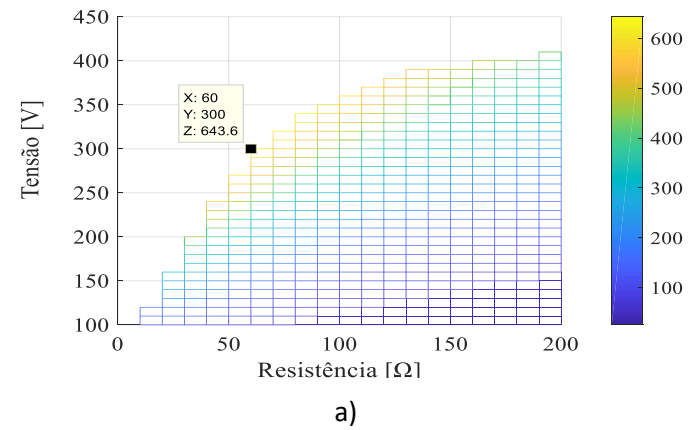
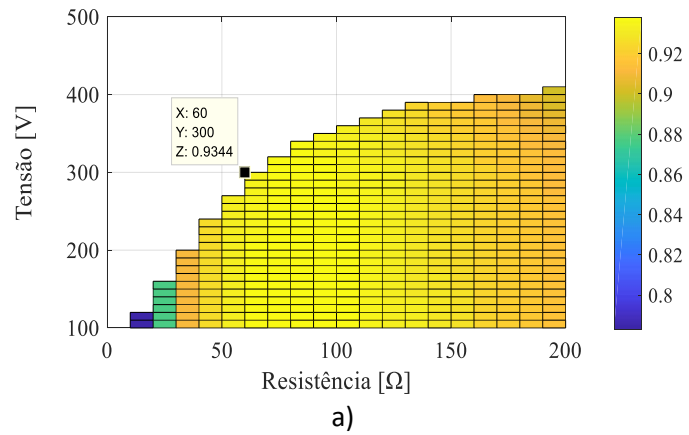
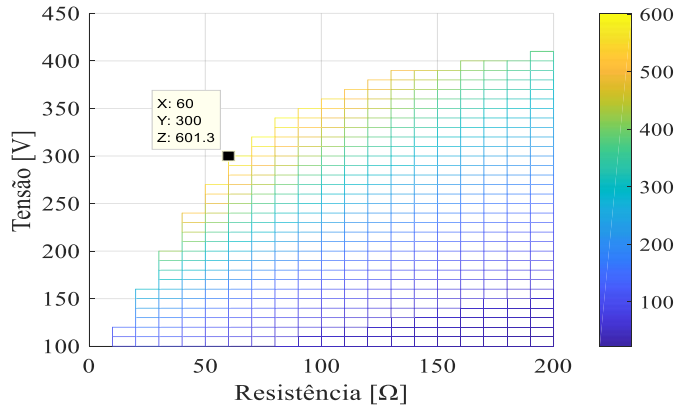
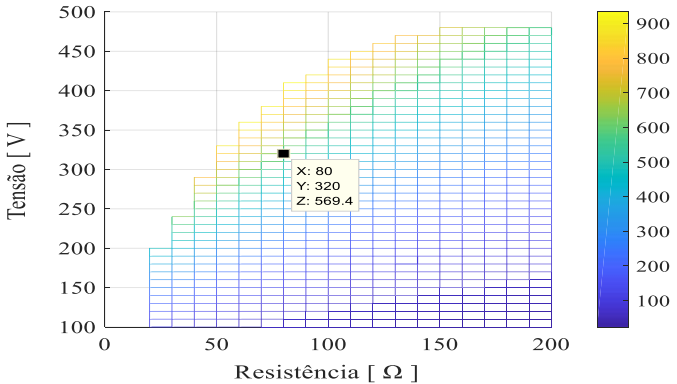


Fig-4. 15: Rendimento do a) Fe Si e b) Hy50

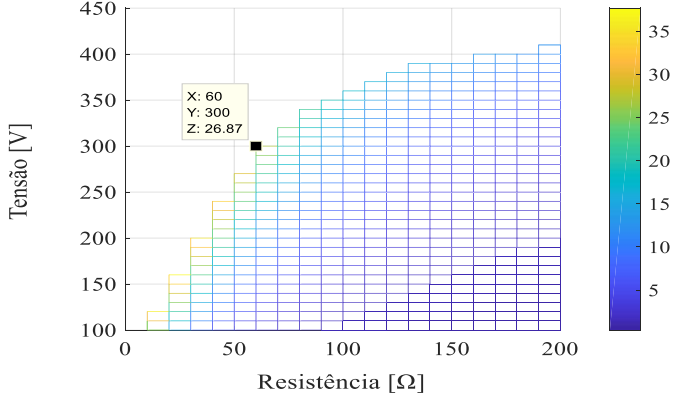


a)

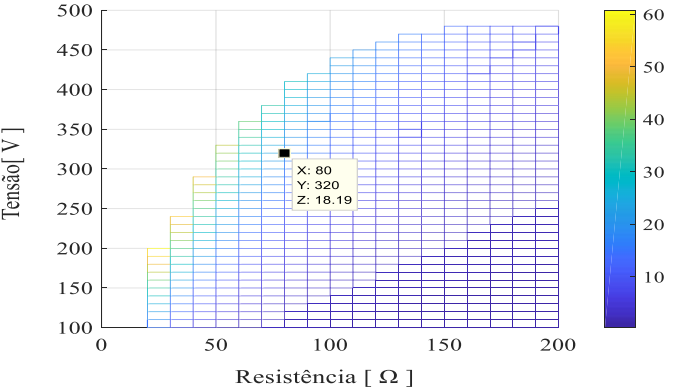


b)

Fig-4. 16:-Potência de entrada no a) Fe Si e b) Hy50

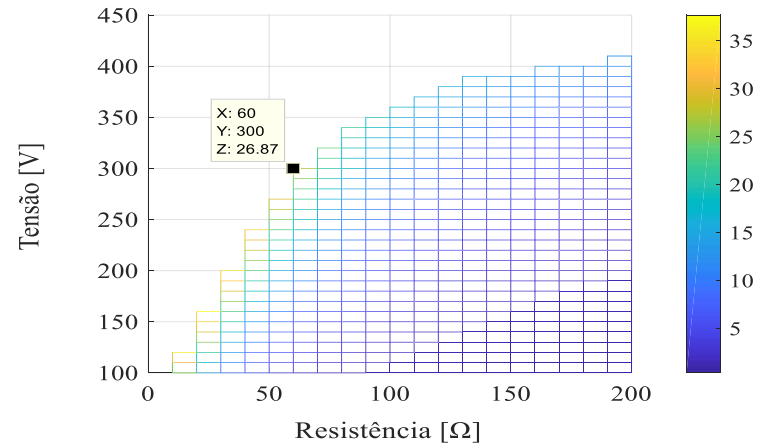


a)

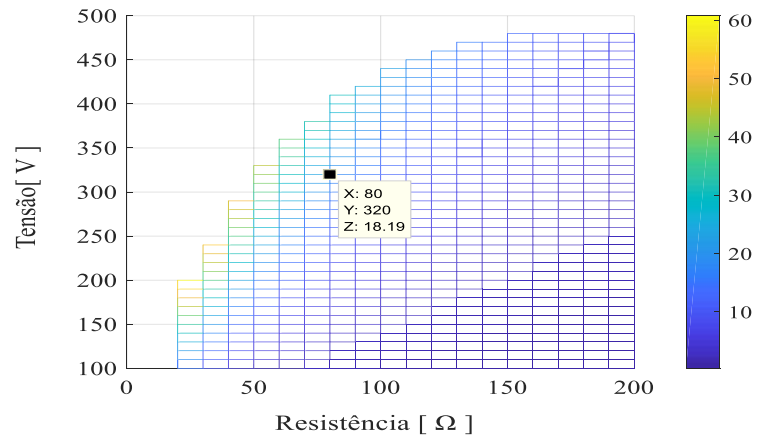


b)

Fig-4. 17: Potência de saída: a) Fe Si e b) Hy50

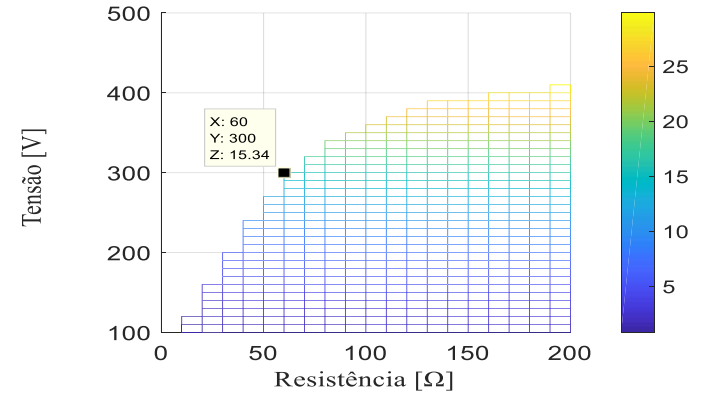


a)

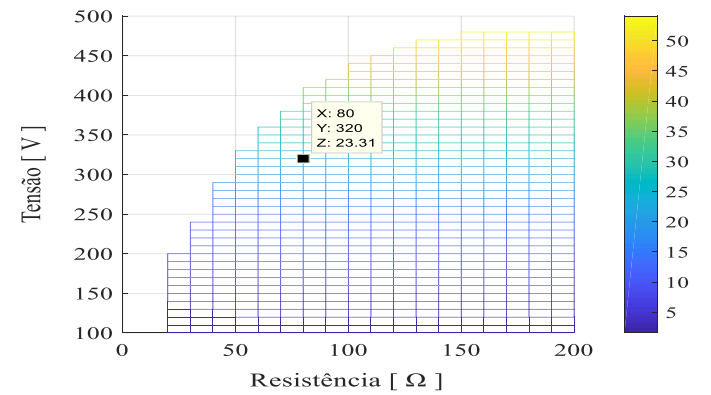


b)

Fig-4. 18: Perdas no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50

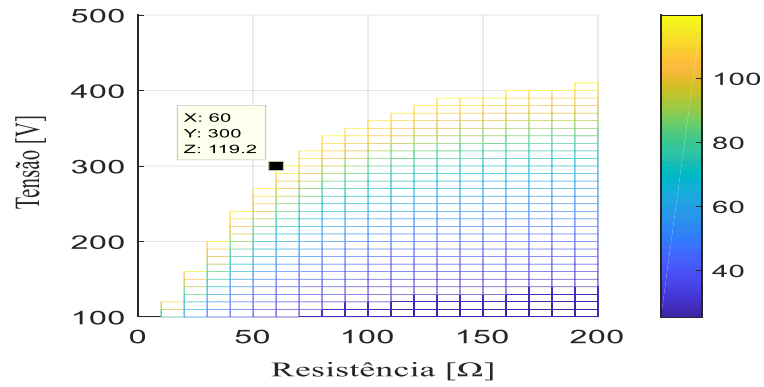


a)

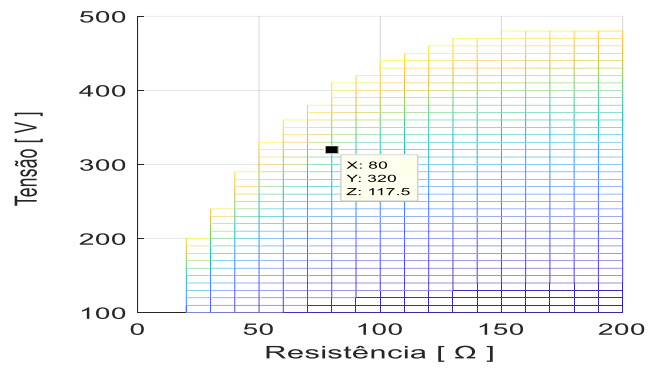


b)

Fig-4. 19: Perdas no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50

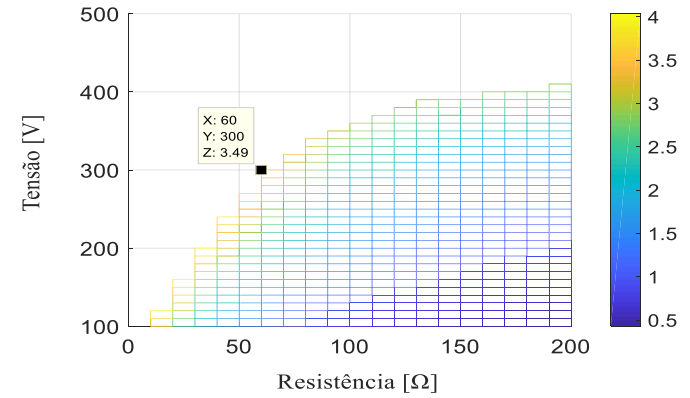


a)

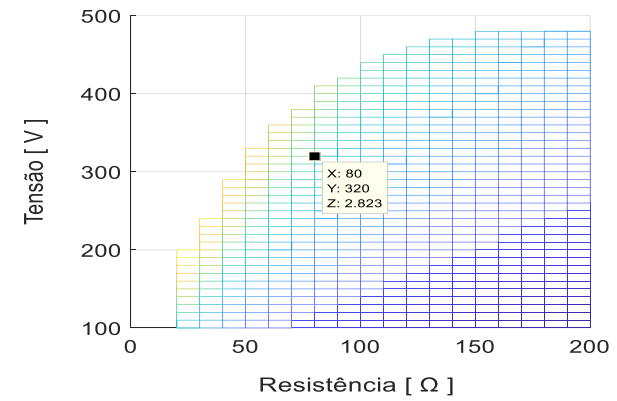


b)

Fig-4. 20: Perdas no Ferro: a) Fe Si e b) Hy50

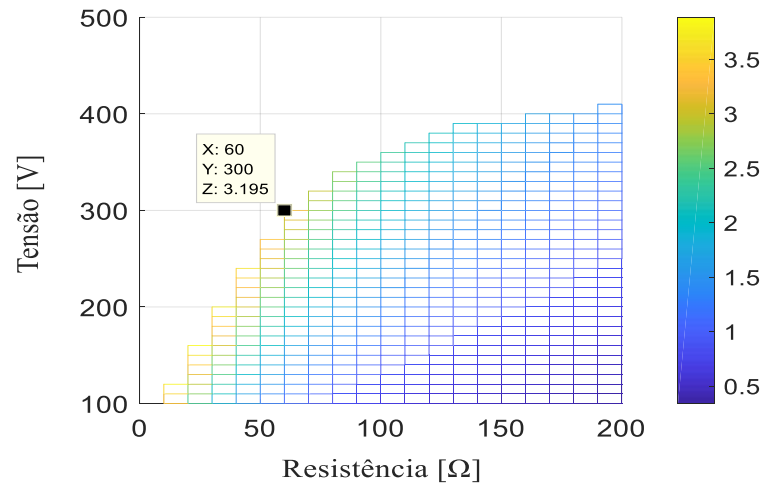


a)

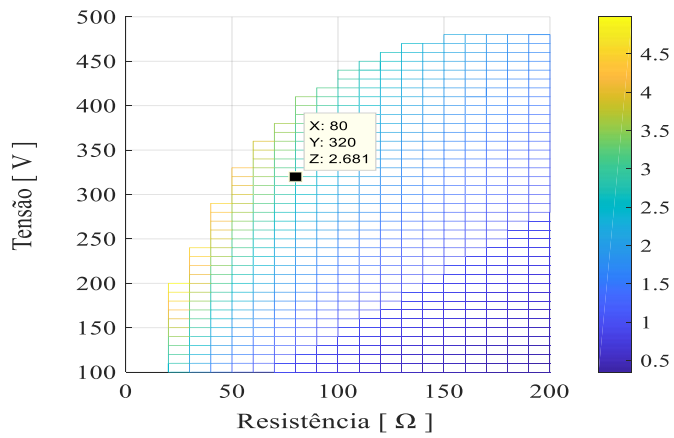


b)

Fig-4. 21: Temperatura no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50

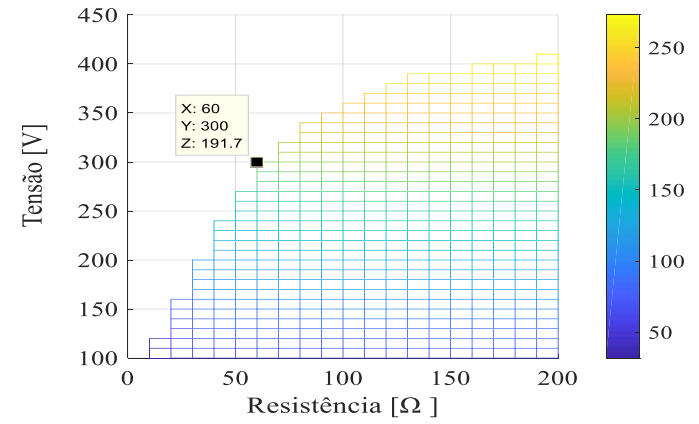


a)

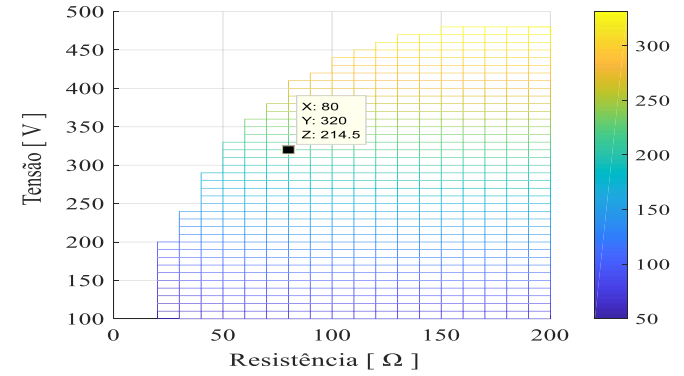


b)

Fig-4. 22: Corrente eficaz na linha 1: a) Fe Si e b) Hy50

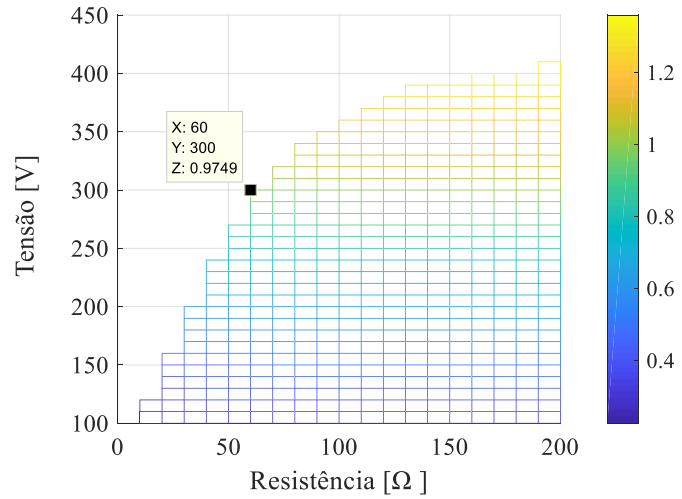


a)



b)

Fig-4. 23: Corrente eficaz na linha 2: a) Fe Si e b) Hy50



a)

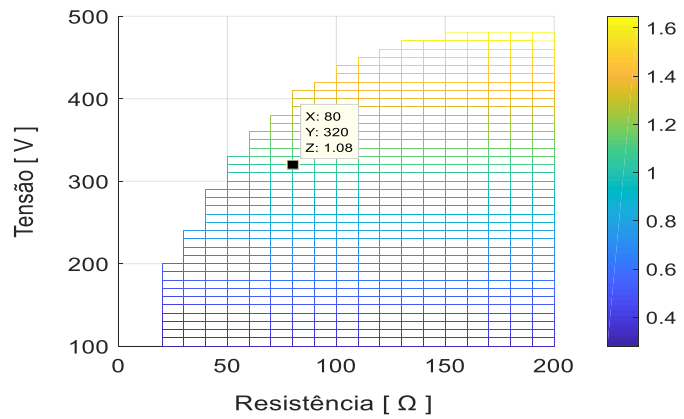
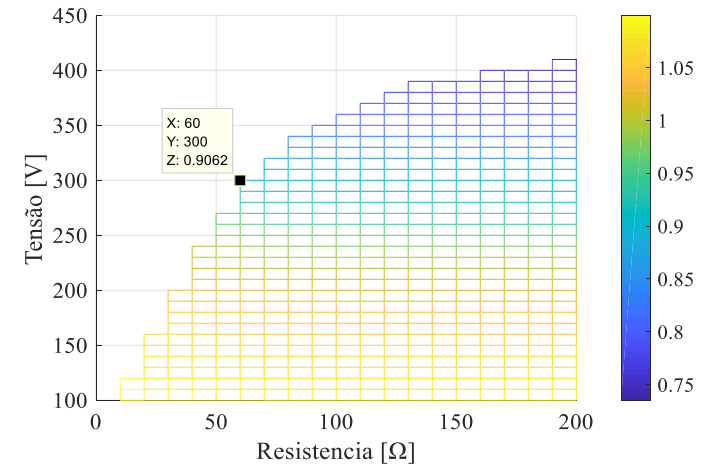


Fig-4. 24: Tensão eficaz no secundário 2: a) Fe Si e b) Hy50



a)

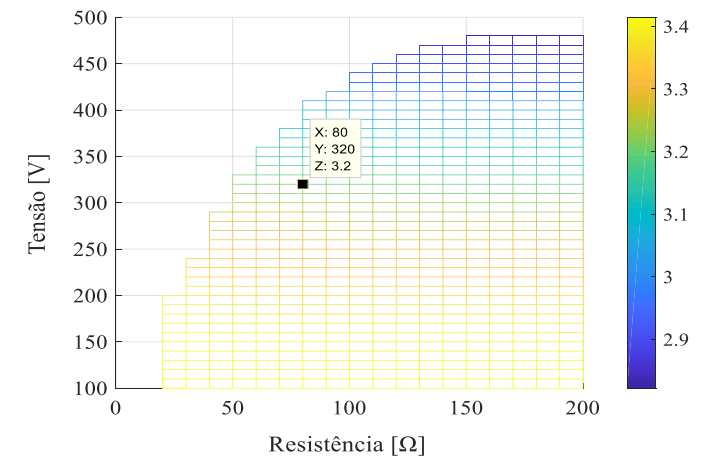
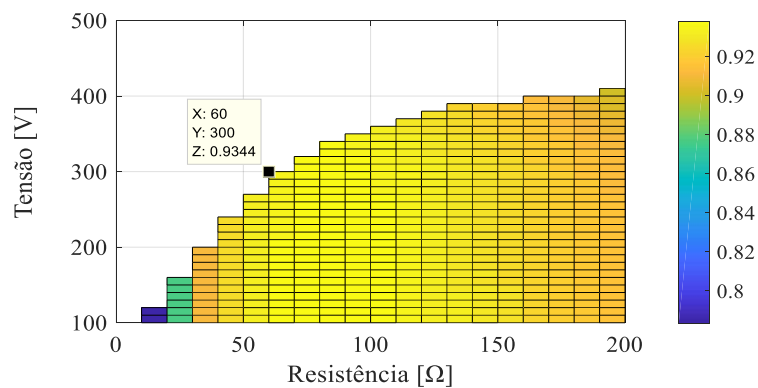


Fig-4. 25: Indução magnética B: a) Fe Si e b) Hy50

b)

Apêndice D



a)

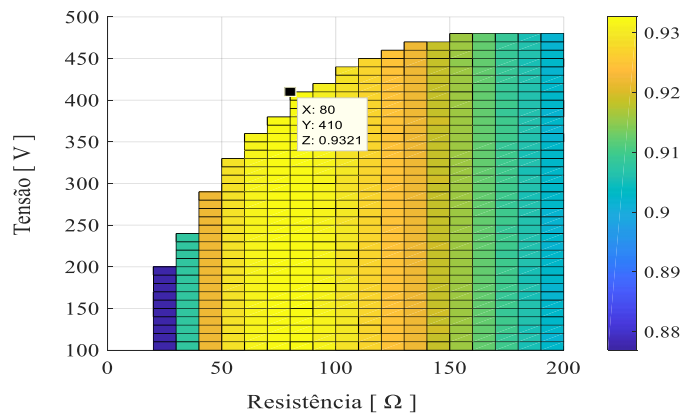
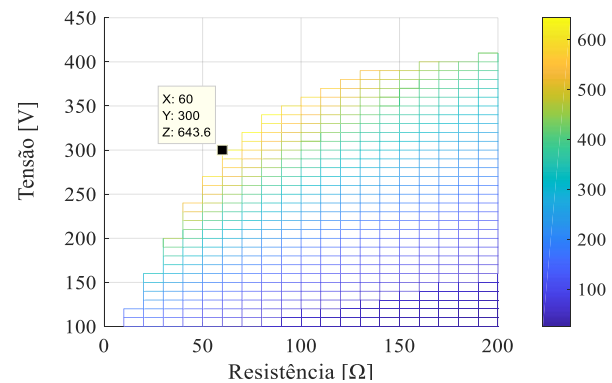


Fig-4. 26:-Indutância Mútua Lm: a) Fe Si e b) Hy50

b)



a)

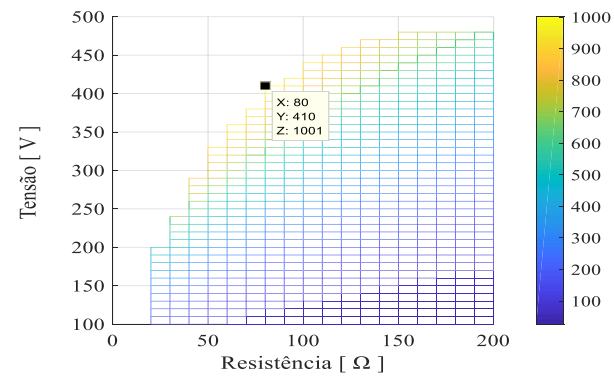


Fig-4. 27: Rendimento do a) Fe Si e b) Hy50

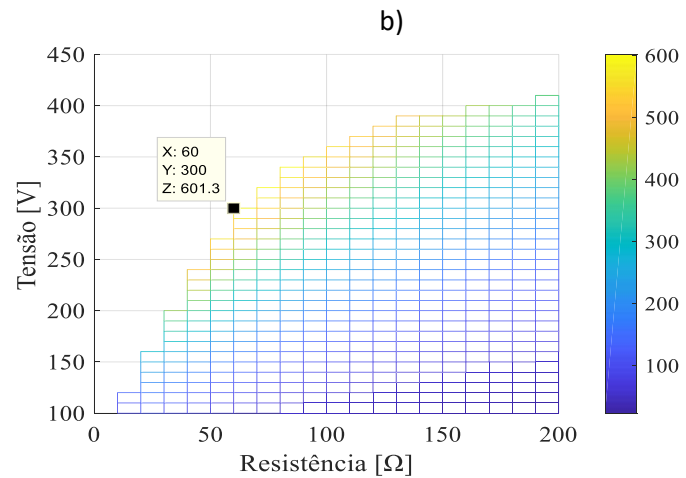
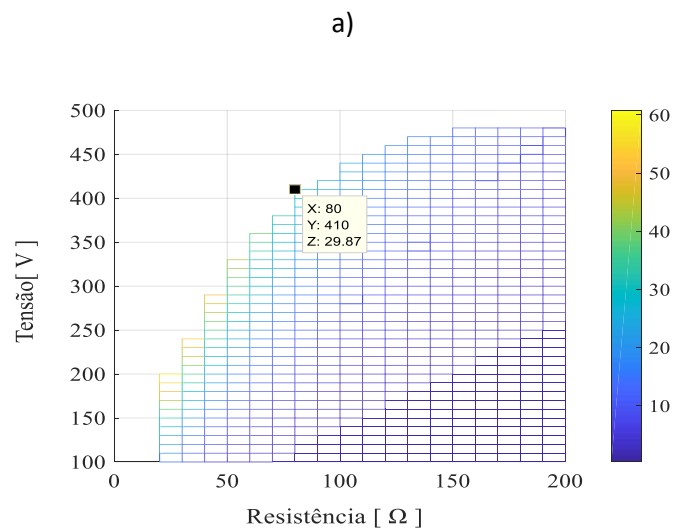
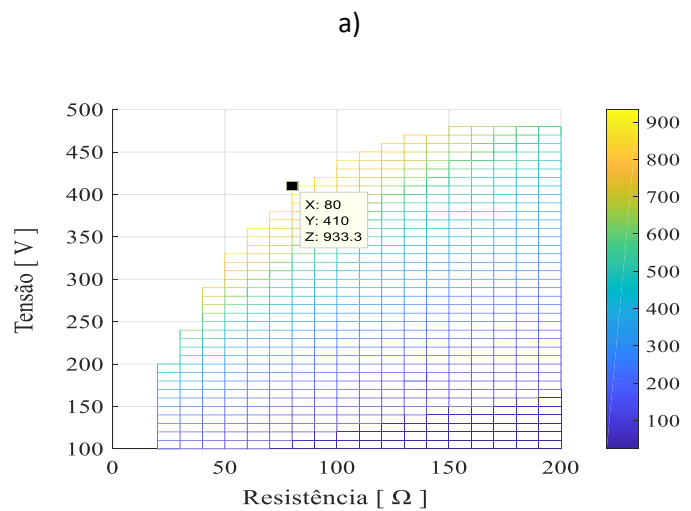
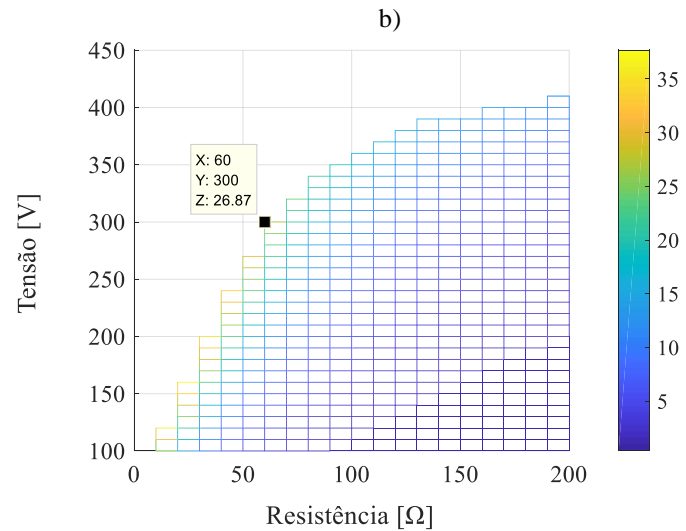
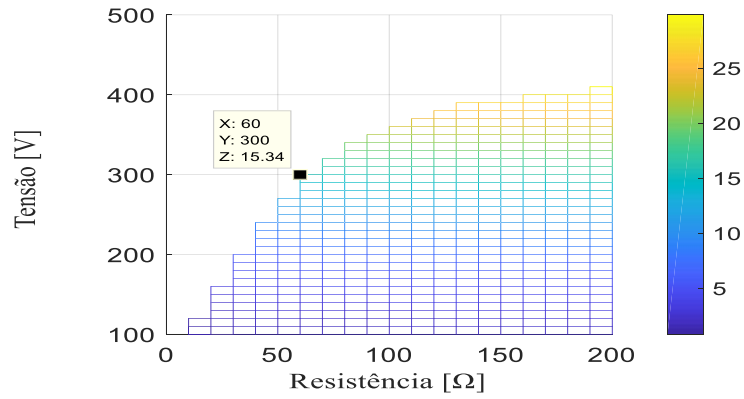


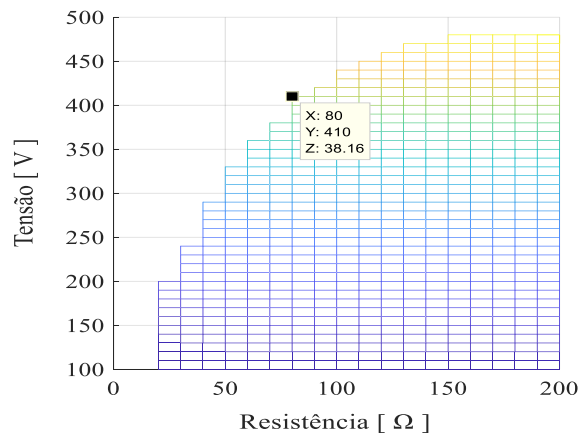
Fig-4. 28: Potência de entrada no a) Fe Si e b) Hy50



b)
Fig-4. 29: Potencia de Saída: a) Fe Si e b) Hy50

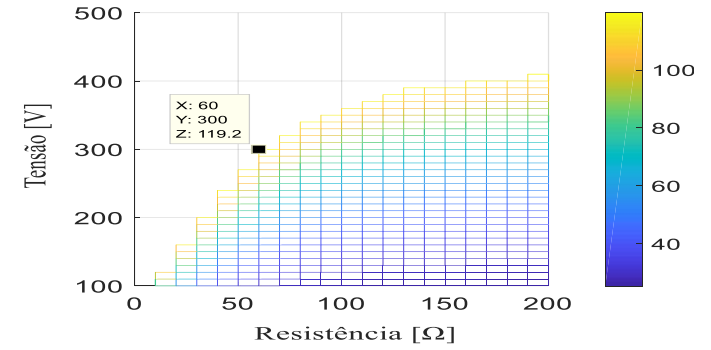


a)

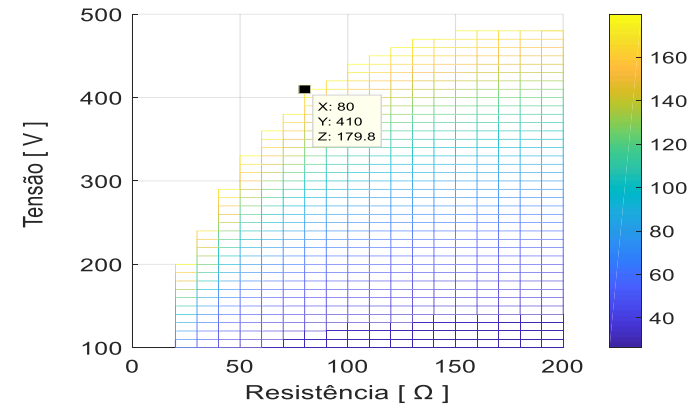


b)

b)
Fig-4. 30: Perdas no cobre: a) Fe Si e b) Hy50

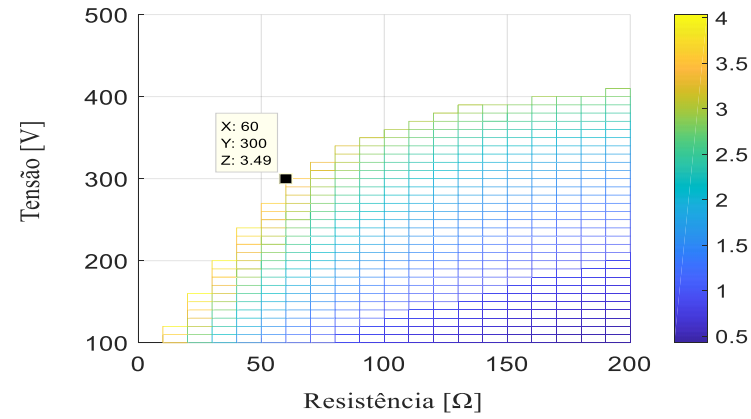


a)

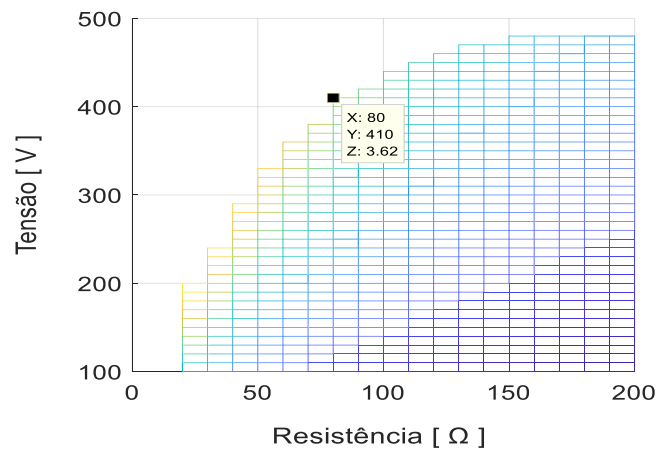


b)

Fig-4. 31: Perdas no Ferro: a) Fe Si e b) Hy50

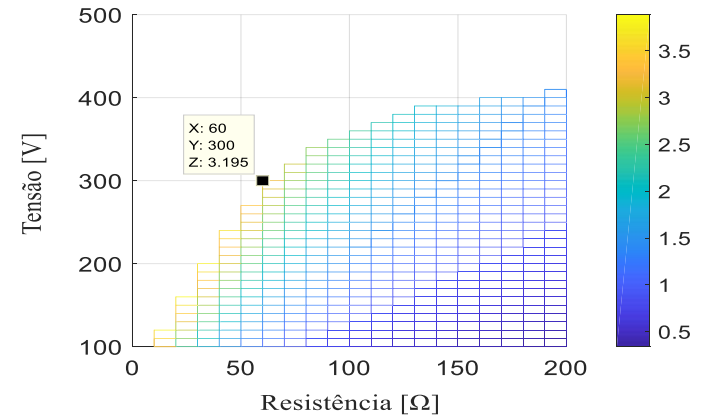


a)

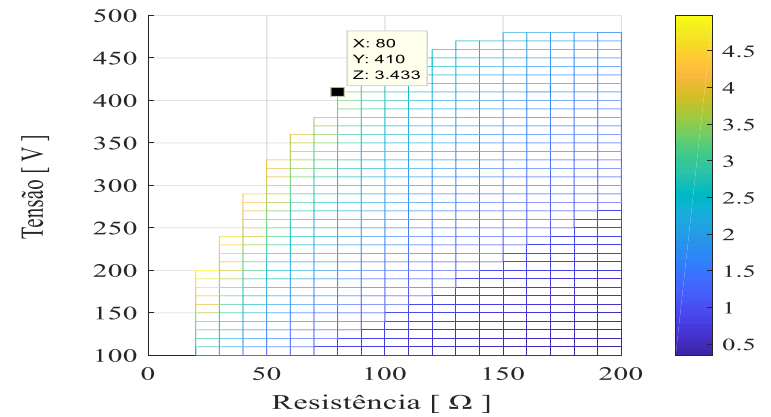


b)

Fig-4. 32: Temperatura no Cobre: a) Fe Si e b) Hy50

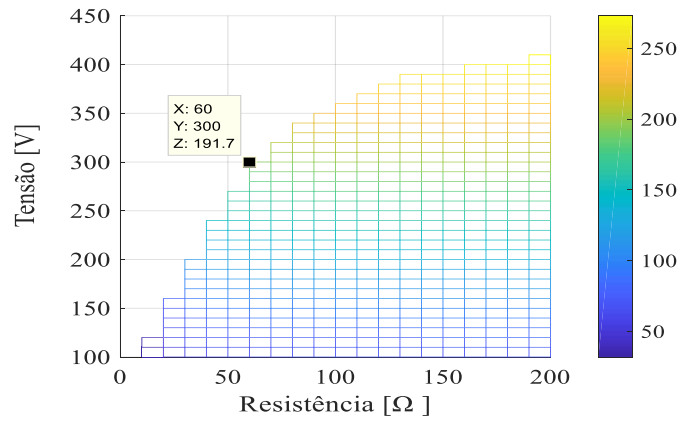


a)

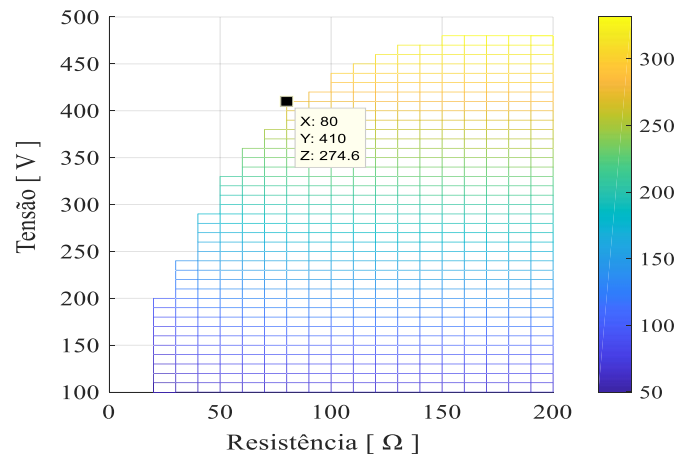


b)

Fig-4. 33: Corrente eficaz na linha 1: a) Fe Si e b) Hy50

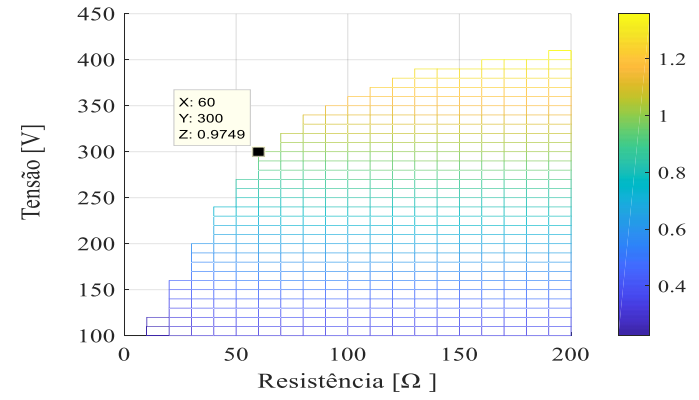


a)

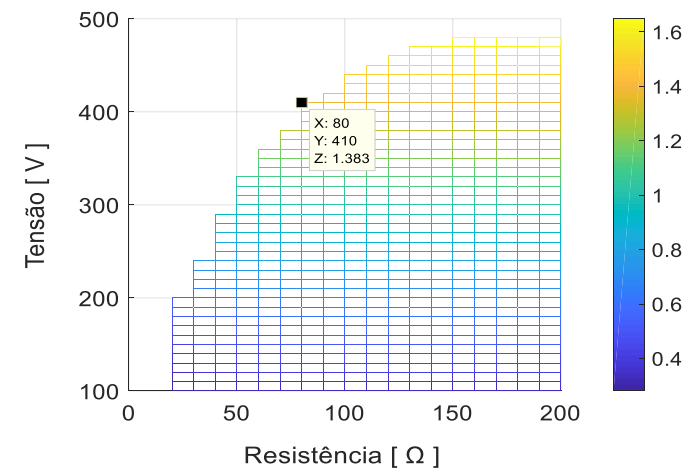


b)

Fig-4. 34: Corrente eficaz na linha 2: a) Fe Si e b) Hy50



a)



b)

Fig-4. 35: Tensão eficaz no secundário 2: a) Fe Si e b) Hy50

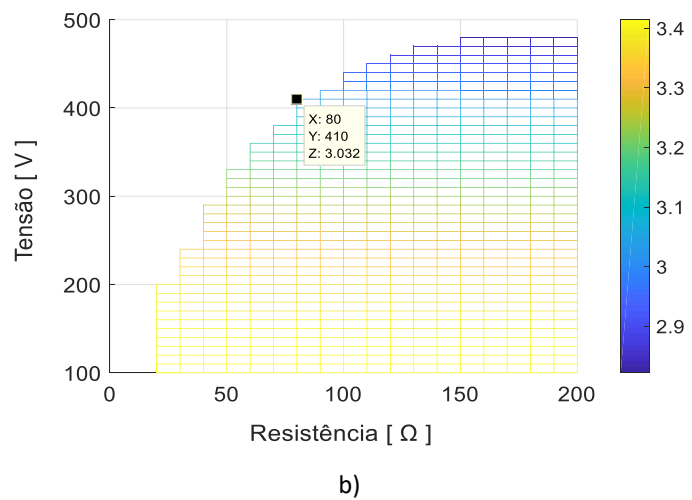
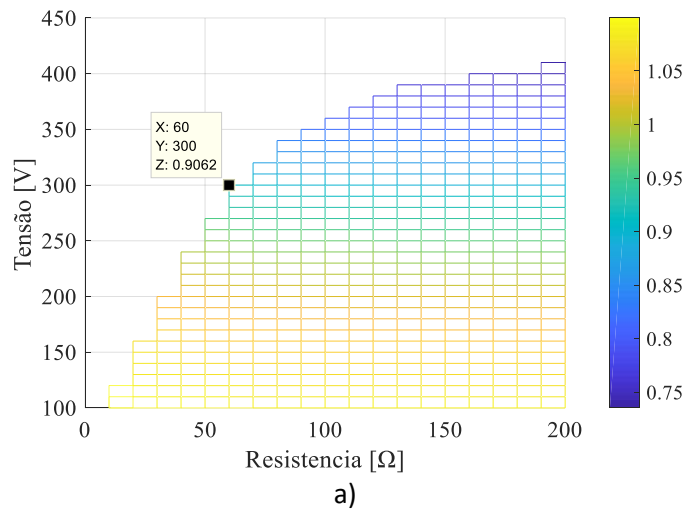


Fig-4. 36: indução magnética B: a) Fe Si e b) Hy50

Fig-4. 37: Indutância Mútua L_m : a) Fe Si e b) Hy50