



Paulo Rogério Santos Figueira

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Projecto e construção de um transformador de potência supercondutor

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

Orientador: Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, Prof. Doutora, FCT/UNL

Co-orientador: João Miguel Murta Pina, Prof. Doutor, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando José Almeida Vieira do Coito

Arguente: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Março de 2013

Projecto e construção de um transformador de potência supercondutor

Copyright © Paulo Rogério Santos Figueira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento não foi escrito ao abrigo do novo acordo ortográfico.

À Filipa.

À minha mãe.

À minha avó materna.

Agradecimentos

Desde o início da dissertação, contei com o apoio de inúmeras pessoas que tornaram possível a conclusão da mesma. Sem estes contributos esta dissertação não teria sido possível.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, Professora Anabela Pronto e Professor João Murta Pina, pelo apoio e total disponibilidade ao longo do estudo da dissertação.

Aos restantes professores do Departamento de Engenharia Electrotécnica pelos ensinamentos transmitidos ao longo do curso.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelo acolhimento e formação.

Aos meus colegas do laboratório de supercondutividade do DEE, pela camaradagem, boa disposição e auxílio nas mais determinadas tarefas. Agradecimento especial para Nuno Vilhena, Pedro Arsénio e Nuno Amaro, pela ajuda na integração no laboratório. Aos restantes colegas de curso e de trabalho, também um forte agradecimento.

Aos meus amigos que participaram directa ou indirectamente na elaboração deste trabalho. A vossa presença foi importante nas mais diversas fases da minha vida. Quaisquer referências particulares são sempre injustas para os demais, contudo não poderia deixar de referir um nome, Luis Gonçalves.

Um agradecimento muito especial para quem esteve comigo e me acompanhou nos momentos mais delicados da vida, em especial, a D. Mariana, Conceição Oliveira, Cândido Tavares, Elsa Oliveira, Margarida Luis, Fausto Luis, sem eles tudo teria sido muito mais negro.

À minha família, em especial à minha prima Soraia.

À minha avó materna pelo carinho, presença, preocupação e apoio constante. E à memória do meu avô materno, que partiu cedo demais e sem me ver concluir o curso, sei que teve sempre orgulho de mim.

À minha mãe, a quem devo tudo o que sou. O meu exemplo de vida.

Por fim, mas com maior importância, à Filipa, a quem devo a realização desta tese, pela presença constante e apoio incondicional. Por tudo o que representa e que não precisa de se traduzir em palavras.

Resumo

Os transformadores de potência baseados em supercondutores de alta temperatura têm revelado potencial para diversas aplicações práticas, proporcionando benefícios aos níveis económico, ambiental e operacional. Na presente dissertação, dois protótipos de transformadores monofásicos de 650 VA foram dimensionados, desenvolvidos, ensaiados e caracterizados: um convencional, com enrolamentos de cobre, e outro com o mesmo enrolamento de cobre no primário mas com o secundário composto por fita supercondutora de alta temperatura. Os dois protótipos foram comparados em relação às propriedades magnéticas, perdas, parâmetros eléctricos e rendimento, apresentando e interpretando os resultados obtidos. Foram ainda efectuadas medições para determinar a corrente crítica em AC da fita supercondutora. Os resultados foram comparados com os da corrente crítica obtida em DC para a mesma fita.

Termos-chave: Corrente crítica AC, Supercondutores da alta temperatura, Equipamentos de potência, Equipamentos Supercondutores, Propriedades magnéticas.

Abstract

Power transformers based on High Temperature Superconductors (HTS) technology have revealed potential for several practical applications, offering economic, environmental and operational benefits. In this thesis, two 650 VA single-phase transformers prototypes were dimensioned, developed, tested and characterized: a conventional one, using copper windings, and another with the same primary copper winding, but with a secondary winding made of HTS BSCCO tape. The two prototypes were compared regarding magnetic properties, losses, electric parameters and efficiency, and the results are presented and interpreted. Also, several measures to determine AC critical current of the HTS tape were made. The results are compared with DC critical current for the same tape.

Index Terms – AC Critical Current, High temperature superconductors, Power devices, Superconducting devices, Magnetic properties.

Índice de matérias

1	Introdução.....	1
1.1	<i>Motivação</i>	1
1.2	<i>Objectivos</i>	2
1.3	<i>Organização da dissertação</i>	3
1.4	<i>Contribuições Originais.....</i>	3
2	Estado da Arte	5
3	Fundamentos teóricos.....	15
3.1	<i>Supercondutividade.....</i>	15
3.1.1	Supercondutores de baixa temperatura	15
3.1.2	Supercondutores de alta temperatura	18
3.1.2.1	Supercondutores de alta temperatura de primeira geração (1G) - BSCCO.....	19
3.1.2.2	Supercondutores de alta temperatura de segunda geração (2G) – YBCO.....	20
3.1.3	Perdas nos supercondutores	23
3.2	<i>Materiais magnéticos.....</i>	24
3.2.1	Materiais ferromagnéticos	25
3.2.1.1	Histerese magnética	25
3.2.1.2	Ciclo de histerese magnética.....	27
3.2.1.3	Perdas magnéticas.....	28
3.2.1.3.1	Perdas por histerese	28
3.2.1.3.2	Perdas por correntes de Foucault clássicas	28
3.2.1.3.3	Perdas por correntes de Foucault excedentes.....	29
3.3	<i>Transformador.....</i>	29
3.3.1	Equações gerais do transformador e esquema equivalente de Steinmetz	30
3.3.2	Ensaio do transformador	32
3.3.2.1	Ensaio do transformador em curto-circuito.....	32
3.3.2.2	Ensaio do transformador em vazio.....	34
4	Dimensionamento	37
4.1	<i>Relação entre a potência do transformador e a secção do núcleo ferromagnético.....</i>	38
4.2	<i>Coefficiente de utilização da janela, K_u</i>	40
4.3	<i>Enrolamentos</i>	41
4.3.1	Comparação dos enrolamentos tipo panqueca e solenoidal.....	41
4.3.2	Cabos Roebel.....	42
4.4	<i>Coefficiente de empilhamento e coefficiente de preenchimento.....</i>	43
5	Aspectos construtivos dos transformadores a ensaiar	45
5.1	<i>Núcleo ferromagnético.....</i>	45
5.2	<i>Enrolamento primário</i>	46
5.3	<i>Enrolamento secundário.....</i>	46

5.4	<i>Crióstato</i>	47
5.5	<i>Protótipo do transformador desenvolvido</i>	48
5.5.1	Potência do transformador	48
5.5.2	Relações tensão/corrente	49
6	Procedimento experimental, resultados obtidos e discussão	51
6.1	<i>Caracterização da fita supercondutora</i>	51
6.2	<i>Caracterização do núcleo</i>	55
6.2.1	Montagem experimental	55
6.2.2	Resultados obtidos	57
6.3	<i>Obtenção dos parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz</i>	60
6.4	<i>Ensaio do transformador em carga</i>	65
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	71
	Referências Bibliográficas	73
	Apêndice	77
	1 Núcleo ferromagnético	77
	2 Crióstato	78
	3 Suporte bobina SAT	79
	4 Suporte bobina cobre	80

Índice de figuras

Figura 2.1 - Comparação entre transformadores convencionais e supercondutores, da gama dos 30 MVA (Pina, 2010).....	7
Figura 2.2 - Transformador supercondutor de 2 MVA com enrolamentos em cabo de Roebel (Bohno, et al., 2005).....	8
Figura 2.3 - Transformador trifásico de núcleo amorfo supercondutor de 630 kVA (Xiao, L., et al., 2012).....	8
Figura 2.4 - Transformador supercondutor para tracção eléctrica (Kamijo, H., et al., 2006).	9
Figura 2.5 – Distribuição do peso de cada um dos constituintes do transformador de tracção eléctrica. Adaptado de (Kamijo, H., et al., 2006).....	10
Figura 3.1 - Heike Kamerlingh Onnes (www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes-bio.html)	15
Figura 3.2 - Diagrama T-J-H ou espaço de fases típico de um supercondutor. O material é supercondutor dentro do volume indicado no espaço de fases.....	16
Figura 3.3 - Curvas de magnetização típicas de supercondutores do tipo I e do tipo II.....	17
Figura 3.4 – Evolução da descoberta dos materiais supercondutores	19
Figura 3.5 - Processo PIT. Adaptado de (Ceballos, J., 2010).....	20
Figura 3.6 - Secções transversal e longitudinal da fita Ag/BSCCO (Santos, D., 2002).....	20
Figura 3.7 – As quatro camadas para a construção das fitas 2G	21
Figura 3.8 - Diagrama das camadas da fita 2G do fabricante AMSC através do método RABiTS/MOD. Adaptado de (Fleshler, S., 2009).	23
Figura 3.9 - Diagrama das camadas da fita 2G do fabricante SP. Adaptado de (http://www.magnet.fsu.edu/mediacenter/publications/flux/vol3issue2/sctape.html).	23
Figura 3.10 - Momento magnético.	24
Figura 3.11 - Curva de primeira magnetização	26
Figura 3.12 - Ciclo de histerese magnética.	27
Figura 3.13 - Correntes de Foucault com e sem laminação do núcleo.....	29
Figura 3.14 - Esquema do transformador monofásico e grandezas envolvidas	30
Figura 3.15 - Esquema equivalente de Steinmetz reduzido ao primário.	31
Figura 3.16 - Esquema equivalente de Steinmetz reduzido ao secundário.	32
Figura 3.17 - Esquema equivalente de Steinmetz simplificado para o ensaio em curto-circuito.....	33
Figura 3.18 – Montagem para o ensaio em curto-circuito.	33
Figura 3.19 - Esquema equivalente de Steinmetz simplificado para o ensaio em vazio.....	34
Figura 3.20 - Montagem para o ensaio em vazio.	35
Figura 4.1 - Curva de magnetização do transformador. Adaptado de (Fitzgerald, A., 2003)	37
Figura 4.2 - Coeficiente de utilização K_u	41
Figura 4.3 - Tipos de enrolamentos (http://www.best-b2b.com/Products/545/570-1/selfbonded-pancake-coil_122533.html), (http://www.tjskl.org.cn/products/single_phase_electromagnet_solenoid_air_core_coils_for_capacitor_resistor-mpz53287a5-z509009a/showimage.html)	42
Figura 4.4 – Cabos de Roebel (condutores transpostos) (http://www.gcsuperconductors.com/about-us/galleries/gcsgallery/hts-cable-and-weave-closeup)	43
Figura 4.5 – Esquema da secção do núcleo de um transformador de 4 degraus	44

Figura 5.1 – Representação do protótipo com secundário com fita supercondutora.....	45
Figura 5.2 - Núcleo ferromagnético	46
Figura 5.3 - Enrolamento primário.....	46
Figura 5.4 - Enrolamentos secundários	47
Figura 5.5 – Crióstato.....	47
Figura 5.6 - Protótipos desenvolvidos.....	48
Figura 6.1 - Montagem experimental para a obtenção da corrente crítica em regime AC para a amostra linear	51
Figura 6.2 - Configurações utilizadas para a realização do ensaio para determinação da corrente crítica	52
Figura 6.3 - Valores recolhidos no ensaio para a obtenção da corrente crítica em AC no caso da fita supercondutora.....	52
Figura 6.4 - Valores recolhidos no ensaio para a obtenção da corrente crítica em AC no caso da bobina supercondutora.	53
Figura 6.5 - Método para obter a corrente crítica em regime AC para uma fita supercondutora. Adaptado de (Thakur, K, 2011)	53
Figura 6.6 - Aproximação à corrente crítica no caso da fita supercondutora.....	54
Figura 6.7 – Aproximação à corrente crítica no caso da bobina supercondutora.....	54
Figura 6.8 – Montagem experimental para obtenção da característica do núcleo.....	56
Figura 6.9 – Evolução do fluxo simples em função da corrente no primário	58
Figura 6.10 - Curva de primeira magnetização para o núcleo ferromagnético	58
Figura 6.11 – Ciclos de histerese para o valor de densidade de fluxo magnético de 1T.....	59
Figura 6.12 – Evolução da permeabilidade magnética relativa em função da densidade de fluxo magnético	59
Figura 6.13 - Perdas magnéticas totais em função da densidade de fluxo magnético.....	60
Figura 6.14 - Montagem do ensaio para obtenção dos valores do ramo transversal do esquema equivalente de Steinmetz.....	61
Figura 6.15 - Esquema equivalente de Steinmetz simplificado para a obtenção dos valores do ramo transversal.	62
Figura 6.16 – Esquema equivalente de Steinmetz com os parâmetros do transformador convencional.	63
Figura 6.17 – Esquema equivalente de Steinmetz com os parâmetros do transformador supercondutor.....	64
Figura 6.18 - Zona de contacto entre a travessa e as colunas molhada (caminho do fluxo magnético).....	65
Figura 6.19 – Potência activa absorvida à rede para diferentes valores de carga.....	66
Figura 6.20 – Corrente no primário dos transformadores para diferentes valores de carga.....	66
Figura 6.21 – Tensão no primário dos transformadores para diferentes valores de carga.	67
Figura 6.22 - Potência aparente no primário dos transformadores para diferentes valores de carga	67
Figura 6.23 – Rendimento dos transformadores para diferentes valores de carga	68
Figura 6.24 – Rendimento dos transformadores para diferentes valores de carga (ampliado) ...	68
Figura 6.25 - Variação de tensão no primário dos transformadores para diferentes valores de carga	69

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Valores típicos de tensão de curto-circuito à corrente estipulada, η_{cc} , consoante os níveis de tensão e potência, Retirado de (Schlabach, 2008).	6
Tabela 2.2 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em redes eléctricas	11
Tabela 2.3 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em redes eléctricas (continuação)	12
Tabela 2.4 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em redes eléctricas (continuação)	13
Tabela 2.5 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em tracção eléctrica.....	14
Tabela 4.1 - Fracção da área do círculo ocupada pelo núcleo e respectivas coordenadas dos vários degraus (VECCHIO, R., 2010).....	44
Tabela 5.1 - Valores nominais das relações de tensão/corrente	49
Tabela 6.1 - Características técnicas da fita Innost Bi-2223	51
Tabela 6.2 - Resultados do ensaio em vazio	60
Tabela 6.3 - Resultados do ensaio em curto-circuito	61
Tabela 6.4 - Resultados do ensaio para obtenção do ramo transversal	62
Tabela 6.5 - Parâmetros do ensaio em vazio	62
Tabela 6.6 - Parâmetros do ensaio em curto-circuito	63
Tabela 6.7 - Parâmetros do ensaio para a obtenção do ramo transversal	63
Tabela 6.8 - Resultados obtidos dos ensaios em carga para transformador convencional	65
Tabela 6.9 - Resultados obtidos dos ensaios em carga para transformador supercondutor	65
Tabela 7.1 – Resumo das características e resultados obtidos nos ensaios do transformador convencional e do transformador com secundário em material supercondutor	71

Simbologia

	Descrição	Unidades
A_c	Área total que os condutores ocupam na janela do transformador	m^2
a_c	Secção recta do condutor	m^2
a_{c1}	Secção recta do condutor do primário do transformador	m^2
a_{c2}	Secção recta do condutor do secundário do transformador	m^2
A_j	Área da janela do transformador	m^2
A_p	Area product	Adim
B_{ef}	Valor eficaz do campo de indução magnética	T
B_r	Indução magnética remanescente ou densidade de fluxo magnético remanescente	T
B_m	Intensidade do campo de indução magnética máximo	T
B	Vector campo de indução magnética	T
d_m	Densidade do material	$Kg. m^{-3}$
E	Vector Campo eléctrico	$V. m^{-1}$
e	Espessura das chapas	m
F_m	Força magnetomotriz	A.e
f	Frequência	Hz
H_c	Campo magnético coercivo ou coercividade	$A. m^{-1}$
H_c	Campo magnético crítico	$A. m^{-1}$
H_{c1}	Campo magnético crítico inferior	$A. m^{-1}$
H_{c2}	Campo magnético crítico superior	$A. m^{-1}$
H	Vector campo magnético	$A. m^{-1}$
\bar{I}_{20}	Fasor da corrente eléctrica de magnetização referida ao secundário	A
\bar{I}_2	Fasor da corrente eléctrica no secundário e referida ao primário	A
\bar{I}'_1	Fasor da corrente eléctrica no primário e referida ao secundário	A
\bar{I}_1	Fasor da corrente eléctrica no primário	A
\bar{I}_{10}	Fasor da corrente eléctrica de magnetização referida ao primário	A
\bar{I}_2	Fasor da corrente eléctrica no secundário	A
$i_1(t)$	Corrente eléctrica no primário do transformador	A

$i_2(t)$	Corrente eléctrica no secundário do transformador	A
I_{ef10}	Valor eficaz da corrente eléctrica do ensaio em vazio	A
I_{ef}	Valor eficaz da corrente eléctrica	A
I_{efcc}	Valor eficaz da corrente eléctrica do ensaio em curto-circuito	A
J_c	Densidade de corrente crítica	$A \cdot m^{-2}$
K_j	Coefficiente de relação da área da janela com a área do ferro	Adim
K_u	Coefficiente de utilização da janela	Adim
k_f	Coefficiente de preenchimento	Adim
k_l	Coefficiente de empilhamento	Adim
l_{11}	Coefficiente de auto indução principal da bobina do primário	H
l_{22}	Coefficiente de auto indução principal da bobina do secundário	H
L_M	Coefficiente de indução mútua	H
L	Coefficiente de auto indução total	H
m	Relação de transformação	Adim
M	Vector de magnetização	$A \cdot m^{-1}$
m	Momento magnético	$A \cdot m^{-1}$
N_1	Número de espiras da bobina do primário	Adim
N_2	Número de espiras da bobina do secundário	Adim
P_h	Perdas por histerese específicas	$W \cdot Kg^{-1}$
P_0	Potência eléctrica activa do ensaio em vazio	W
P_{cc}	Potência eléctrica activa do ensaio em curto-circuito	W
P_{cl}	Perdas específicas por correntes de Foucault	$W \cdot Kg^{-1}$
P_{exc}	Perdas excedentes específicas	$W \cdot Kg^{-1}$
P_t	Perdas magnéticas totais específicas	$W \cdot Kg^{-1}$
r''_1	Resistência eléctrica do primário referida ao secundário	Ω
r'_2	Resistência eléctrica do secundário referida ao primário	Ω
r_1	Resistência eléctrica da bobina do primário do transformador	Ω
r_2	Resistência eléctrica da bobina do secundário do transformador	Ω
R_m	Relutância magnética	H^{-1}
r_p	Resistência de perdas no ferro	Ω
r''_p	Resistência de perdas no ferro referida ao secundário	Ω
r_v	Redução do tempo de vida útil do transformador	horas
S_{Fe}	Área da secção transversal do núcleo	m^2
S	Potência aparente	VA
T_c	Temperatura crítica	K

\bar{U}'_2	Fasor da tensão no secundário, referida ao primário	V
\bar{U}''_1	Fasor da tensão no primário, referida ao secundário	V
\bar{U}_1	Fasor da tensão no primário do transformador	V
\bar{U}_2	Fasor da tensão no secundário do transformador	V
$u_1(t)$	Tensão no primário do transformador	V
u_{1n}	Tensão nominal do primário de um transformador	V
$u_2(t)$	Tensão no secundário do transformador	V
u_{2n}	Tensão nominal do secundário de um transformador	V
U_{ef}	Valor eficaz da tensão	V
U_{efcc}	Valor eficaz da tensão do ensaio em curto-circuito	V
U_{efo}	Valor eficaz da tensão eficaz do ensaio em circuito em vazio	V
Vol	Volume do material	m ³
X_1	Reactância de dispersão do primário	Ω
X'_2	Reactância de dispersão do secundário, referida ao primário	Ω
X''_1	Reactância de dispersão do primário, referida ao secundário	Ω
X_2	Reactância de dispersão do secundário	Ω
X_{fe}	Reactância de magnetização do ferro	Ω
X''_{fe}	Reactância de magnetização do ferro referida ao secundário	Ω
\bar{Z}_c	Impedância de carga	Ω
\bar{Z}'_c	Impedância de carga, referida ao primário	Ω
\bar{Z}_{eq}	Impedância equivalente	Ω
η_{cc}	Tensão de curto-circuito à corrente nominal	%
λ''_{11}	Coefficiente de auto indução de dispersão do primário, referido ao secundário	H
λ'_{22}	Coefficiente de auto indução de dispersão do secundário, referido ao primário	H
λ_{11}	Coefficiente de auto indução de dispersão do primário	H
λ_{22}	Coefficiente de auto indução de dispersão do secundário	H
$\Phi_{Fe}(t)$	Fluxo magnético simples no ferro	Wb
Ψ_1	Fluxo magnético ligado com o primário	Wb
$\Psi_{1d}(t)$	Fluxo magnético de dispersão ligado com a bobina do primário	Wb
$\Psi_{1p}(t)$	Fluxo magnético principal ligado com o primário	Wb
Ψ_2	Fluxo magnético total ligado com o secundário	Wb

$\Psi_{2d}(t)$	Fluxo magnético de dispersão ligado com a bobina do secundário	Wb
$\Psi_{2p}(t)$	Fluxo magnético principal ligado com o secundário	Wb
Ψ	Fluxo magnético ligado total	Wb
μ_0	Permeabilidade magnética do vazio ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$)	H. m ⁻¹
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	Adim
μ	Permeabilidade magnética absoluta do material	H. m ⁻¹
ρ	Resistividade eléctrica do material	$\Omega \cdot m$
τ	Constante de tempo do integrador	s
ω	Frequência angular	s ⁻¹
χ_m	Susceptibilidade magnética	adim

Notações

1G	Fita supercondutora de primeira geração
2G	Fita supercondutora de segunda geração
AC	<i>Alternating current</i>
AMSC	<i>American Superconductor</i>
AT	Alta tensão
AWG	<i>American Wire Gauge</i> (unidade de medida da secção recta de fios e cabos eléctricos padronizada)
Bi-2212	Supercondutores de composição química $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$
Bi-2223	Supercondutores de composição química $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{12}$
BSCCO	Supercondutores de composição química $Bi_2Sr_2Ca_nCu_{n+1}O_{6+2n}$, com $n=0,1,2$
BT	Baixa tensão
DC	<i>Direct current</i>
FP	Factor de potência
IBAD	<i>Ion Beam Assisted Deposition</i>
MMD	Materiais magnéticos duros
MMM	Materiais magnéticos macios
MOCVD	<i>Metal-Organic Chemical Vapour Deposition</i>
MT	Média tensão
PIT	<i>Powder-in-tube</i>
RABiTS	<i>Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrate</i>
RT	Regulação de tensão
SAT	Supercondutores de alta temperatura
SBT	Supercondutores de baixa temperatura
SFCL	<i>Superconducting fault current limiter</i>
SMES	<i>Superconducting magnetic energy storage</i>
SP	<i>Super Power</i>
TC	Transformador convencional
TFS-MOD	<i>Trifluoroacetate Metal Organic Deposition</i>
TSC	Transformador supercondutor
YBCO	Supercondutores de composição química $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, sendo δ o teor de oxigénio
YBCO-123	YBCO na sua fase supercondutora

1 Introdução

1.1 Motivação

A eficiência energética é um dos assuntos mais debatidos por todo o mundo. A sociedade actual é cada vez mais dependente de energia, pelo que é crucial a continuidade da sua produção e fornecimento. Contudo, existe uma preocupação crescente com políticas energéticas sustentáveis, isto é, com a utilização racional da energia. Além das consequências ambientais resultantes do uso abusivo das suas fontes, há também a questão da sua optimização em termos económicos. Assim, tem surgido a necessidade de construir sistemas com o melhor rendimento possível, ou seja, com menores perdas associadas: a mesma eficácia é obtida mas com custos operacionais significativamente reduzidos.

A supercondutividade destaca-se exactamente nesta procura pela optimização do rendimento das máquinas e materiais envolvidos na produção, transformação e transporte de energia. A descoberta das potencialidades dos materiais supercondutores levou à construção de vários tipos de máquinas eléctricas ditas supercondutoras. Além da potencial redução das perdas envolvidas, decorre a vantagem de tornar estas máquinas mais leves e compactas, o que facilita a aplicação das mesmas.

Entre as diversas máquinas supercondutoras, encontram-se os transformadores de potência, em foco nesta dissertação.

Os supercondutores podem ser classificados quanto à sua temperatura. Considerando uma temperatura de referência, os supercondutores são considerados de alta temperatura quando funcionam acima desta, e de baixa temperatura quando abaixo da mesma. Para efeitos do presente trabalho, a temperatura de referência considerada é a de ebulição do azoto líquido, isto é 77K.

Estes transformadores são constituídos por um núcleo ferromagnético idêntico ao utilizado nos transformadores convencionais e por bobinas de material supercondutor. Estas bobinas são normalmente de material supercondutor de alta temperatura devido à facilidade de arrefecimento com azoto líquido, à temperatura de 77K. Tal como os transformadores convencionais, esta é essencialmente uma máquina estática de transformação de tensão e corrente, que serve para transferir energia eléctrica de um circuito para o outro.

Os materiais supercondutores mais utilizados nos seus enrolamentos são *BSCCO-2223* e *YBCO-123*, pois apresentam temperaturas críticas mais elevadas, tornando-os mais atractivos.

Para induzir características supercondutoras às bobinas, é necessário que estas sejam arrefecidas. Para isso, existem duas possibilidades: A primeira consiste em envolver as bobinas num crióstato contendo azoto líquido. Em alternativa, há a possibilidade de submergir todo o transformador no azoto líquido.

No primeiro caso, embora se requeira uma menor porção de azoto e se mantenha o núcleo à temperatura ambiente, surge a dificuldade da construção do próprio crióstato e o aumento do fluxo de dispersão.

Em relação à segunda possibilidade, apesar de se aumentarem as perdas magnéticas e de a mesma envolver um maior volume de líquido, as vantagens residem no facto de o próprio azoto líquido funcionar como sistema de arrefecimento e isolamento acústico. Além disso, constitui um menor risco para o ambiente (substituição de óleo por azoto líquido) e possibilita a sua operação em sobrecarga sem danificar os materiais isolantes, aumentando o seu tempo de vida útil.

Estas possibilidades, tal como outros pressupostos em torno da supercondutividade, estão ainda em fase de estudo, devido à complexidade do tema e da implementação deste tipo de sistemas. A presente dissertação foi, em parte, precisamente impulsionada pela possibilidade de contribuir para a promoção e desenvolvimento desta promissora tecnologia.

1.2 Objectivos

O objectivo da presente dissertação é o desenvolvimento e análise de dois protótipos de transformadores de potência: um convencional, utilizando enrolamentos de cobre, e outro com o primário também em cobre mas com o secundário em fita supercondutora. A análise é baseada no verdadeiro impacto (nos parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz) que a utilização de material supercondutor (e respectivo material envolvido) tem no transformador, comparando vantagens e desvantagens.

Quanto a objectivos específicos:

- Estudo teórico dos fenómenos da supercondutividade.
- Estudo teórico do funcionamento do transformador.
- Dimensionamento do transformador.
- Projecto e construção de dois protótipos de transformador.
- Realização de ensaios laboratoriais de modo a obter informação sobre o comportamento do transformador com supercondutor e com material convencional.
- Análise e crítica dos resultados experimentais.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação organiza-se em 7 capítulos, nomeadamente:

- **Capítulo 1:** Introdução

Neste primeiro capítulo, é introduzido o trabalho desenvolvido, as motivações para o seu desenvolvimento, quais os seus objectivos e como se encontra organizado.

- **Capítulo 2:** Estado da Arte

Apresentação do transformador supercondutor e das suas características, tal como as vantagens e desvantagens associadas comparativamente ao transformador convencional; também é feito o levantamento do respectivo estado de arte.

- **Capítulo 3:** Fundamentos teóricos

Aborda os aspectos teóricos envolvidos na supercondutividade, nos materiais magnéticos e no funcionamento de um transformador.

- **Capítulo 4:** Dimensionamento

Neste capítulo é apresentado um dimensionamento detalhado para o transformador.

- **Capítulo 5:** Aspectos construtivos

Neste capítulo abordam-se os aspectos construtivos dos protótipos construídos, em termos de materiais a utilizar e das características dos mesmos.

- **Capítulo 6:** Procedimento experimental, resultados obtidos e discussão

Aqui apresenta-se o dimensionamento dos transformadores, os resultados provenientes dos ensaios realizados para a caracterização da fita e do núcleo, e os ensaios necessários para a caracterização dos transformadores. Faz-se também referência aos métodos utilizados para a aquisição de dados nos ensaios.

- **Capítulo 7:** Conclusões

Apresentam-se as conclusões retiradas do desenvolvimento deste trabalho e ainda algumas considerações sobre trabalhos futuros neste âmbito.

1.4 Contribuições Originais

As contribuições originais presentes neste trabalho consistem na análise e comparação do esquema equivalente de Steinmetz de dois transformadores de potência, um convencional, e outro com o primário em cobre e secundário em fita supercondutora, verificando o impacto da fita supercondutora nos parâmetros do esquema equivalente.

2 Estado da Arte

Um transformador de potência supercondutor (TSC) é similar a um transformador convencional (TC), excepto no que respeita aos enrolamentos, constituídos por material supercondutor. Este material é normalmente de alta temperatura, devido à facilidade de arrefecimento com azoto líquido. Várias vantagens da utilização de enrolamentos supercondutores nos transformadores de potência podem ser enumeradas (Mehta, Aversa, & Walker, 1997), (McConnell, Metha, & Walker, 2000):

1. Potencial melhoria de rendimento.
2. Redução do peso e dimensões.
3. Possibilidade de operar em sobrecarga sem danificar o isolamento.
4. Aumento do tempo de vida útil.
5. Menor risco para o ambiente.
6. Capacidade de actuar como limitador de corrente.
7. O líquido criogénico funciona como sistema de arrefecimento, isolamento eléctrico e acústico.
8. Potencial redução da impedância interna (menor tensão de curto-circuito à corrente nominal)

Os transformadores supercondutores, além de não necessitarem de dissipadores de calor, têm condutores que apresentam uma densidade de corrente superior face aos condutores convencionais, o que permite utilizar menos secção de material, que por sua vez possibilita a redução do núcleo do transformador. Este é um factor muito importante, pois além de reduzir o peso, reduz também as suas dimensões, facilitando a sua colocação em campo. Na figura 2.1 são comparadas as dimensões e massa de transformadores convencionais e supercondutores da gama dos 30 MVA.

O óleo, conhecido por ser contaminante e inflamável, apresenta-se como o dieléctrico e o método refrigerante dos transformadores convencionais. Nos transformadores supercondutores, este é substituído por um líquido criogénico, normalmente azoto líquido, implicando assim um menor risco para o ambiente.

O tempo de vida útil de um transformador convencional (normalmente 30 anos) está limitado pelos seus materiais isolantes. Assim, o calor gerado pelo funcionamento do transformador é um problema a evitar, já que reduz o seu tempo de vida útil. No caso dos transformadores supercondutores, este problema é evitado através da utilização de temperaturas

criogénicas, além de terem a vantagem de poder operar em sobrecarga (apesar de o rendimento diminuir).

Já nos transformadores convencionais, os problemas de aquecimento são combatidos através do sobredimensionamento do transformador. A redução do tempo de vida útil de um transformador (por hora) é dada pela expressão empírica (Kulkarni & Khaparde, 2004):

$$r_v = e^{0,115525 \cdot \Delta\theta} \quad (2.1)$$

Onde $\Delta\theta$ representa o aumento de temperatura face à temperatura nominal, em °C.

Facilmente se pode verificar que um aumento de 20 °C reduz o tempo de vida do transformador em 10 horas. Assim, por cada hora em sobrecarga, a vida do transformador é reduzida em 10 horas.

As características do material superconductor possibilitam que o transformador actue como limitador de corrente, pois se a densidade de corrente aumentar para além da sua capacidade, este perde as suas capacidades supercondutoras, passando ao estado normal (resistivo).

A última vantagem a ser referida a respeito da utilização dos transformadores supercondutores tem a ver com uma possibilidade na melhoria do rendimento do transformador. Esta melhoria deve-se ao facto da resistência eléctrica nos condutores supercondutores ser muito menor do que nos convencionais. Devido a esta redução de resistência existe a possibilidade de redução da tensão de curto-circuito (η_{cc}) à corrente nominal. Este parâmetro (η_{cc}) determina a variação na tensão do transformador em carga, relativamente à tensão nominal, e a magnitude das correntes de curto-circuito (Karsai, Kerényi, & Kiss, 1987). Quanto menor for η_{cc} , menor será a variação da tensão no secundário numa maior gama de potência, mas maior será a corrente de curto-circuito. Os valores de η_{cc} nos transformadores convencionais situam-se entre 4% e 16%, aumentando com a potência. Estes valores podem ser consultados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores típicos de tensão de curto-circuito à corrente estipulada, η_{cc} , consoante os níveis de tensão e potência, Retirado de (Schlabach, 2008).

Tensão [kV]	Tipo de transformador	Potência [MVA]	η_{cc} [%]
$U_{2n} < 1$	MT/BT	0,05-0,63	4
$U_{2n} < 1$	MT/BT	0,63-2,5	6
$1 < U_{2n} < 66$	MT/MT	2,5-25	6-9
$U_{2n} > 66$	AT/MT	25-63	10-16

Para a construção de um transformador supercondutor, e devido à necessidade de arrefecer os enrolamentos para que estes funcionem como supercondutores, existem duas possibilidades:

- Envolver as bobinas num crióstato contendo azoto líquido: esta tem como vantagem a utilização de menor quantidade de azoto, pois apenas arrefece os enrolamentos, deixando o núcleo à temperatura ambiente. A desvantagem associada é o aumento do fluxo de dispersão, e também a dificuldade de construção dos crióstatos.
- Submergir todo o transformador no líquido criogénico. Esta, além de necessitar de uma maior quantidade de líquido, aumenta as perdas magnéticas. Apesar disso, funciona como sistema de arrefecimento e isolamento acústico. Outras vantagens são os factos de afectarem menos o ambiente (substituição de óleo por azoto líquido) e poderem operar em sobrecarga sem danificar os materiais isolantes, aumentando o seu tempo de vida útil.

No primeiro caso, diz-se que o TSC construído é um TSC de núcleo quente, por permanecer à temperatura ambiente, e no segundo, de núcleo frio, por ser refrigerado.

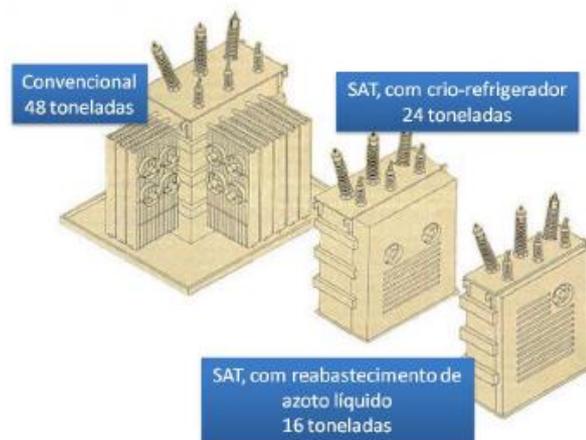


Figura 2.1 - Comparação entre transformadores convencionais e supercondutores, da gama dos 30 MVA (Pina, 2010).

Vários protótipos têm vindo a ser construídos, apesar dos custos associados ao investimento inicial. Contudo, além de se apresentarem como ecologicamente vantajosos, numa perspectiva de longo-prazo, estes custos poderão vir a ser compensados pela potencial sustentabilidade económica. Na figura 2.2 apresenta-se um transformador supercondutor de 2 MVA com enrolamentos em cabo de Roebel.



a) Antes da montagem do crióstato



b) Completo

Figura 2.2 - Transformador supercondutor de 2 MVA com enrolamentos em cabo de Roebel (Bohno, et al., 2005).

Na área da energia, o projecto mais recente utilizando supercondutores é o desenvolvimento da primeira subestação de potência supercondutora do mundo. Neste projecto utilizam-se cabos de energia supercondutores, um transformador supercondutor, um limitador de corrente supercondutor (SFCL - *Superconducting Fault Current Limiters*) e um electromagneto supercondutor para armazenamento de energia (SMES - *Superconducting Magnetic Energy Storage*). De todos estes, destaca-se o transformador supercondutor (TSC), em relevo nesta dissertação.

Este TSC de 630 kVA, representado na figura 2.3 e descrito na tabela 2.4, foi ligado à rede eléctrica da cidade de Changji em 2005 por mais de dois meses, sem falhas (Xiao, L., et al., 2012). O núcleo deste transformador destaca-se do de outros, pois é composto por material amorfo.



Figura 2.3 - Transformador trifásico de núcleo amorfo supercondutor de 630 kVA (Xiao, L., et al., 2012).

Estes materiais, ao contrário das ligas metálicas convencionais (cristalinas) utilizadas nos núcleos, caracterizam-se pela configuração aleatória e desordenada dos átomos. A sua principal vantagem é apresentarem menores perdas no ferro, podendo atingir os 75% de redução face às ligas cristalinas (DeCristofaro, 1998). Esta redução deve-se ao ciclo de histerese ser mais estreito, a apresentarem menores perdas por correntes de Foucault devido à diminuição da espessura das chapas e, ainda, a apresentarem maior resistividade eléctrica, duas a três vezes maior do que as ligas metálicas convencionais.

As desvantagens, por outro lado, estão relacionadas principalmente com a manufactura do material. Estas advêm da dureza e da dificuldade de uniformização do material, o que diminui o factor de empilhamento (80% contra os 95% das ligas cristalinas), aumentando o volume do equipamento (Vieira, Pinto, Teixeira, Fraga, Silveira, & Oliveira, 2000).. Esta dificuldade de manufactura implica também um maior custo de produção.

A vantagem da diminuição de peso referida anteriormente pode ser um factor com bastante relevância para a utilização destes equipamentos para tracção eléctrica.

Um dos projectos descritos na tabela 2.5 e representado na figura 2.4, é a construção de um transformador supercondutor de 4MVA para utilização em tracção eléctrica. Neste projecto foi possível a redução em cerca de 20% do peso face aos transformadores convencionais. A figura 2.5 mostra a distribuição do peso de cada um dos constituintes do transformador supercondutor de tracção eléctrica (Kamijo, H., et al., 2006).



Figura 2.4 - Transformador supercondutor para tracção eléctrica (Kamijo, H., et al., 2006).

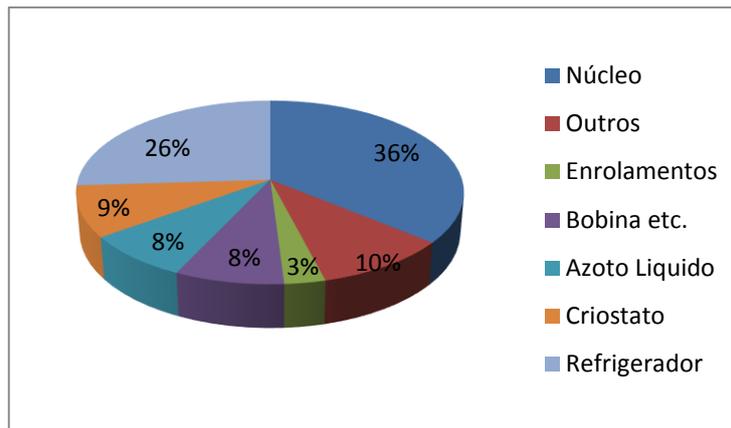


Figura 2.5 – Distribuição do peso de cada um dos constituintes do transformador de tracção eléctrica. Adaptado de (Kamijo, H., et al., 2006).

Nas tabelas 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 são apresentados alguns protótipos de transformadores supercondutores construídos até à data.

Tabela 2.2 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em redes eléctricas

Ano	Organização	País	Tipo	Material	Potência [kVA]	U_{1n}/U_{2n} [kV]	I_{1n}/I_{2n} [A]	T [K]	η [%]	η_{cc} [%]
1997	Kyushu University; Fuji Electric Co.; Sumitomo Electric Industries, Ltd.	Japão	Monofásico; Crióstato	Cabo Roebel em fita Bi-2223	500; (800)	6,6/3,3	76/152; (121/242)	77; (66)	99,1; (99,3)	0,67
1999	Oak Ridge National Laboratory; Intermagnetics General Corporation; Waukesha Electric Systems; IGC/APD Cryogenics; Rochester Gas and Electric Company; Rensselaer Polytechnic Institute	Estados Unidos da América	Monofásico; Crióstato	Condutores revestidos a Bi-2212	1000	13,8/6,9	72,5/145	25	-	1,68
2001	Soonchunhyang University; Woosuk University; Korea Polytechnic University; Chonnam National University; Seoul National University	Coreia do Sul	Monofásico; Crióstato	Panquecas duplas com Bi-2223	10	0,440/0,220	22,7/45,4	77	-	10,7
2001	Soonchunhyang University; Woosuk University; Chonnam National University; Seoul National University	Coreia do Sul	Trifásico Y/ Δ ; Crióstato	Panquecas duplas com Bi-2223	10	0,440/0,220	13,1/26,2	77	-	-

Tabela 2.3 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em redes eléctricas (continuação)

Ano	Organização	País	Tipo	Material	Potência [kVA]	U_{1n}/U_{2n} [kV]	I_{1n}/I_{2n} [A]	T [K]	η [%]	η_{cc} [%]
2001	Kyushu University; Fuji Electric Co.; Kyushu Transformer Co.; Taiyo Toyo Sanso Co.; yushu Electric Power Co.	Japão	Monofásico; Crióstato	Cabo Roebel em fita Bi-2223	1000	22/6,9	45,5/145	77	-	5
2004	Hebei University; Institute of Electrical Engineering; Tebian Electric Apparatus Stock Co.;	China	Monofásico; Núcleo frio	Primário solenoidal, secundário com panquecas duplas, ambos em fita Bi-2223	9	0,240/0,0096	37,5/938	77	-	2,79
2005	Seoul National University; Electrical Engineering and Science Research Institute; Korea Polytechnic University; Hyosung Corporation	Coreia do Sul	Monofásico; Crióstato	Panquecas duplas com Bi-2223	1000	22,9/6,6	44/152	65	99,3	4,67
2005	SuperPower, Inc; Oak Ridge National Laboratory; Waukesha Electric Systems	Estados Unidos da América	Trifásico Δ/Y	Fita Bi-2223	5000/10000	24,9/4,2	116/694	30	-	0,84
2005	Fuji Electric Systems Co.; Super-GM	Japão	Monofásico; Crióstato	Cabo Roebel em fita Bi-2223	2000	66/6,9	30,3/290	66	-	10,38

Tabela 2.4 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em redes eléctricas (continuação)

Ano	Organização	País	Tipo	Material	Potência [kVA]	U_{1n}/U_{2n} [kV]	I_{1n}/I_{2n} [A]	T [K]	η [%]	η_{cc} [%]
2006	via Nuova delle Brecece 260; Università di Cassino; Università di Napoli Federico II; Seconda Università di Napoli; Marcianise (CE)	Itália	Monofásico; Núcleo frio	Primário em cobre; Secundário em Fita Bi-2223	10	1/0,230	10/43,3	77	-	-
2006	Institute of Electrical Engineering; Tebian Electric Apparatus Stock CO.;	China	Monofásico; Crióstato	Primário solenoidal, secundário com panquecas duplas, ambos em fita Bi-2223	45	2,4/0,160	17,75/281,25	77	-	2,46
2007/2009	Institute of Electrical Engineering; Technical Center of Tebian Electric Apparatus Stock Co.; Beijing Key Laboratory of High Voltage and EMC	China	Trifásico Y/Yn; Crióstato; Núcleo amorfo	Primário solenoidal, secundário com panquecas duplas, ambos em fita Bi-2223	630	10,5/0,4	34,64/909,33	77	98,5	2,5
2011	Industrial Research Limited; Wilson Transformer Pty Ltd; Landcare Research	Nova Zelândia	Trifásico Δ/Y ;	Primário com panquecas duplas, secundário solenoidal com Roebel ambos em YBCO	1000	11/0,415	30/1390	70	-	-
2011	University of Canterbury	Nova Zelândia	Núcleo parcial; Bi-2223	Fita Bi-2223	15	230/230	65/65	77	98,6	10,1

Tabela 2.5 - Lista de projectos de transformadores de potência supercondutores para aplicação em tracção eléctrica

Ano	Organização	País	Tipo	Material	Potência [kVA]	U_{1n}/U_{2n} [kV]	I_{1n}/I_{2n} [A]	Temperatura [K]	Rendimento [%]	η_{cc} [%]
2003	Siemens AG	Alemanha	Monofásico; núcleo frio	Primário com condutores empilhados, secundário cabo Roebel, ambos em Bi-2223	1000	25/2*1,389	40/2*360	66	-	-
2006	Railway Technical Research Institute; Fuji Electric Systems, Shinagawa-ku; Fuji Electric Advanced Technology; Taiyo Nippon Sanso; Kyushu University	Japão	Monofásico; núcleo quente	Primário, secundário e terciário em solenóide com fita Bi-2223	4000	25/4*1,2+0,44	160/4*750+909	66	96,8	-

3 Fundamentos teóricos

Neste capítulo abordam-se os conceitos bibliográficos mais relevantes ao desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, é feito o levantamento dos factos mais importantes da história e evolução da supercondutividade, seguindo-se uma abordagem à teoria em torno dos materiais magnéticos e ao funcionamento do transformador.

3.1 Supercondutividade

Os supercondutores podem ser classificados de acordo com a temperatura, isto é, admitindo um valor de temperatura de referência, classificam-se em supercondutores de alta temperatura (SAT) ou de baixa temperatura (SBT).

Importa referir que esta classificação não é consensual por todos os autores, pelo que, na presente dissertação, assumir-se-á a temperatura de 77 K – temperatura de ebulição do azoto líquido – abaixo da qual os supercondutores são classificados como SBT e acima do qual são classificados como SAT. A escolha deste valor como referência baseia-se na possibilidade de obter supercondutividade à custa do arrefecimento com azoto líquido.

3.1.1 Supercondutores de baixa temperatura

O primeiro contacto com as propriedades supercondutoras em determinados materiais aconteceu em 1911, por Heike Kamerlingh Onnes (figura 3.1), professor de Física da Universidade de Leiden, na Holanda. Onnes reparou que, quando arrefecidos a temperaturas muito baixas, perto do zero absoluto, certos materiais ficavam com uma resistência eléctrica nula. Estava assim descoberto um novo estado da matéria, o estado supercondutor.



Figura 3.1 - Heike Kamerlingh Onnes
(www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes-bio.html)

Não havia, de facto, nenhuma teoria para explicar este fenómeno e apenas se sabia que abaixo de certa temperatura os materiais perdiam abruptamente a resistência, e acima desta passavam ao seu estado normal (resistivo). Esse valor de temperatura ficou conhecido como temperatura crítica, T_c . O que foi também verificado por Onnes foi a existência de um valor máximo de corrente eléctrica – densidade de corrente crítica, J_c - que pode ser transportado no supercondutor sem que este passe ao seu estado normal, valor esse que varia inversamente com a temperatura.

Tal como o valor máximo de corrente eléctrica, descobriu-se também um valor máximo de campo magnético – H_c - que destrói o estado supercondutor. Deste modo, as grandezas temperatura crítica (T_c), campo magnético crítico (H_c) e densidade de corrente crítica (J_c) relacionam-se entre si através de uma superfície no espaço, que pode ser representada por um diagrama $T - J - H$ característico do material (Figura 3.2). Dentro do espaço de fases indicado na figura 3.2, o material está no seu estado supercondutor e fora deste passa ao estado normal, caracterizado pela ausência de supercondutividade.

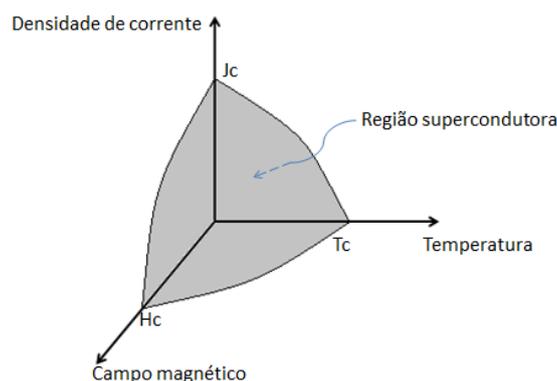


Figura 3.2 - Diagrama T-J-H ou espaço de fases típico de um supercondutor. O material é supercondutor dentro do volume indicado no espaço de fases.

A descoberta da supercondutividade valeu a Heike Onnes o prémio Nobel da Física em 1913.

Em 1933, Walter Meissner e Robert Ochsenfeld contribuíram de forma importante para o progresso da supercondutividade. Os dois físicos alemães repararam que uma esfera de estanho puro, ao entrar no estado supercondutor, e na presença de um campo magnético, expelia completamente o fluxo magnético do seu interior. Descobriram então que o material exibia diamagnetismo perfeito, fenómeno que ficou conhecido como Efeito Meissner.

No interior do supercondutor ter-se-á a seguinte densidade de fluxo magnético:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.1)$$

Verificando-se $\mathbf{B} = 0$, resulta

$$\mathbf{M} = -\mathbf{H} \quad (3.2)$$

A magnetização tem assim módulo igual e sentido contrário ao do campo aplicado, verificando-se diamagnetismo perfeito, ou seja, susceptibilidade magnética (χ_m) igual a -1.

O ano de 1957 ficou igualmente marcado na história da supercondutividade devido a duas grandes descobertas: a teoria microscópica da supercondutividade e a existência de um novo tipo de supercondutores.

Em relação à primeira, também conhecida como teoria BCS, foi criada por John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer. O trabalho dos seus autores veio explicar os até então descobertos fenómenos supercondutores: submetendo os materiais a temperaturas muito baixas, as suas vibrações moleculares abrandam, permitindo que os electrões se emparelhem, formando pares de Cooper, e se desloquem harmoniosamente pela rede cristalina. Assim, deixam de se verificar as colisões habituais dos metais em estado normal, traduzidas em resistência eléctrica.

A segunda descoberta importante foi a dos supercondutores do tipo II (ou duros), por Alexei Alexeyevich Abrikosov. Até à data, eram apenas conhecidos os do tipo I (ou macios), que expõem completamente o fluxo magnético do seu interior – estado Meissner – para valores de campo magnético aplicado abaixo de certo valor crítico H_c .

Os supercondutores do tipo II apresentam um comportamento ligeiramente diferente na medida em que, em vez de se encontrarem sempre no estado Meissner até H_c , verificam dois estados: um primeiro até um valor de campo crítico H_{c1} estado – Meissner – e um segundo, entre H_{c1} e H_{c2} , dito estado misto, em que coexistem zonas supercondutoras e zonas normais. Na Figura 3.3 encontram-se representadas as curva de magnetização típicas de supercondutores dos tipos I e II.

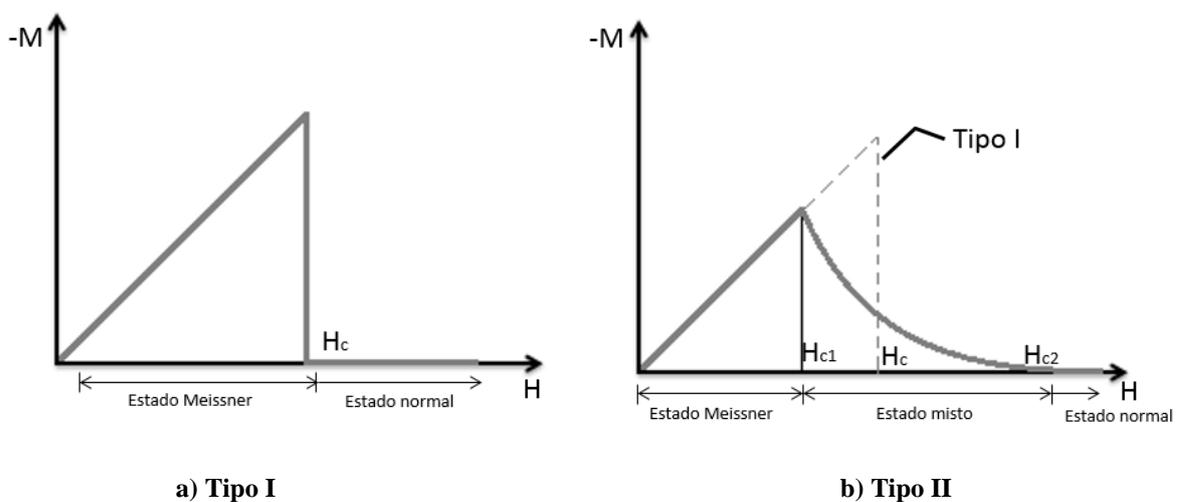


Figura 3.3 - Curvas de magnetização típicas de supercondutores do tipo I e do tipo II.

No estado misto, verificado entre H_{c1} e H_{c2} , o supercondutor começa a permitir a penetração do fluxo magnético da periferia para o seu interior sob a forma de domínios simétricos cilíndricos chamados vórtices ou fluxóides, que se formam paralelamente ao campo aplicado. Conforme o campo aplicado vai aumentando, os fluxóides vão-se difundindo para o interior do material e a repulsão existente entre eles faz com que se disponham sobre uma rede regular e energeticamente estável chamada matriz de Abrikosov.

Existe uma corrente formada por pares de Cooper – corrente persistente ou turbilhonar – associada a cada fluxóide. Para campos magnéticos próximos de H_{c2} , os vórtices começam a sobrepôr-se e o campo de indução dentro do supercondutor intensifica-se em todo o material. Quando o campo magnético atinge valores superiores a H_{c2} , o material perde o estado de supercondutividade, mesmo que se encontre abaixo de T_c .

Todos os supercondutores de alta temperatura são do tipo II, embora o contrário não se verifique. Além disso, todos os supercondutores do tipo I pertencem à classe dos SBT.

3.1.2 Supercondutores de alta temperatura

A supercondutividade voltou a despertar novo interesse em 1986, quando Georg Bednorz e Alexander Muller, dois investigadores da IBM, descobrem supercondutividade em compostos cerâmicos, usualmente considerados maus condutores, com temperaturas críticas acima dos 30 K. Estavam assim descobertos os supercondutores de alta temperatura (SAT).

Esta descoberta levou à investigação de novos compostos de forma a elevar a temperatura crítica dos supercondutores para valores superiores à temperatura de ebulição do azoto líquido (77 K). Desta forma, com a descoberta de temperaturas críticas mais elevadas, foi possível abandonar o hélio líquido (4,2 K) como meio criogénico, bastante mais dispendioso que o azoto líquido, e a utilização dos materiais supercondutores voltou a espoletar novo interesse comercial.

Não existe actualmente nenhuma teoria consensual para a supercondutividade nos SAT. Ainda, a teoria BCS não se aplica nos SAT, não sendo claro o mecanismo de emparelhamento de electrões (Burns, 1992).

Na figura 3.4 é possível observar a evolução cronológica da máxima temperatura crítica conhecida para supercondutores.

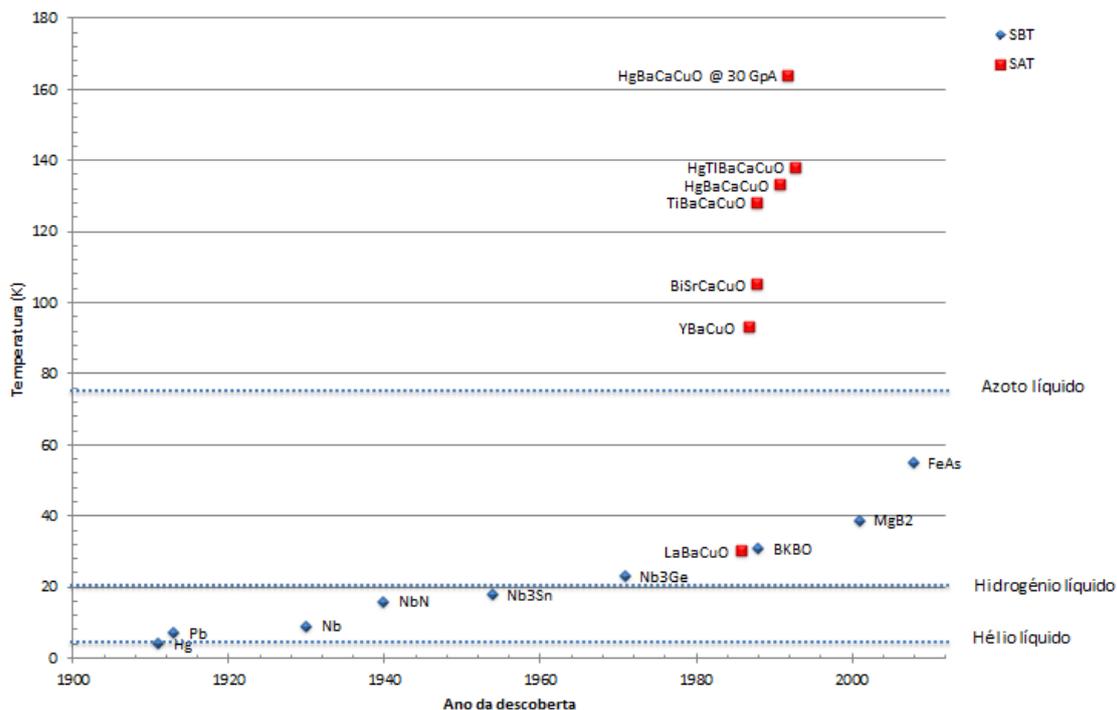


Figura 3.4 – Evolução da descoberta dos materiais supercondutores

Os supercondutores de alta temperatura mais utilizados comercialmente são uma liga de bismuto (Bi), estrôncio (Sr), cálcio (Ca), cobre (Cu) e oxigénio (O), conhecida pela sigla BSCCO-2223 (ou simplesmente Bi-2223), e outra à base de ítrio (Y), bário (Ba), cobre (Cu) e oxigénio (O), conhecida pela sigla YBCO-123 (ou, simplesmente Y-123), com temperaturas críticas de 110 K e 92 K, respectivamente.

3.1.2.1 Supercondutores de alta temperatura de primeira geração (1G) - BSCCO

O BSCCO apresenta-se na forma de fita supercondutora, em que os filamentos de material supercondutor, um ou mais, se encontram embebidos numa matriz de prata. Este material é bastante utilizado nos protótipos de transformadores e muito sensível à acção 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. Estas fitas denominam-se fitas de primeira geração.

O processo de fabrico destas fitas é denominado de PIT (“*powder-in-tube*”), frequentemente usado para fazer condutores eléctricos a partir de materiais supercondutores, como no caso do cerâmico BSCCO. Para a realização do processo PIT, especificamente para a fita monofilamentar, inicialmente é adicionado o pó precursor (de material supercondutor) dentro de uma matriz cilíndrica de prata. De seguida, o tubo é alongado por estiramento, e finalmente

compactado sendo 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 multifilamentar, 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 suficiente (aproximadamente 850 °C) que permita a orientação dos grãos para a direcção preferencial, isto é, onde é máxima a densidade de corrente. Na figura 3.5 está esquematizado o processo PIT.

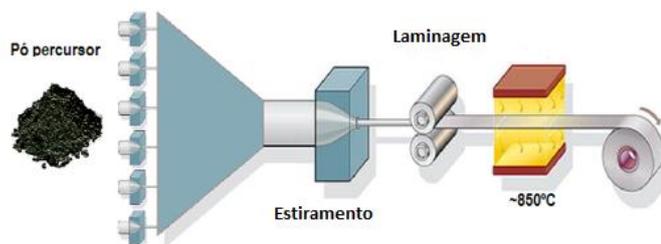
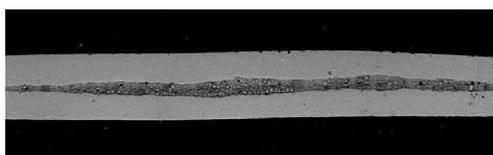
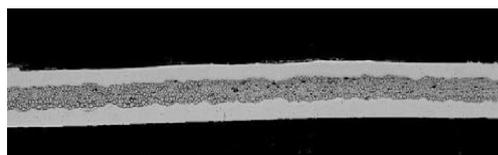


Figura 3.5 - Processo PIT. Adaptado de (Ceballos, J., 2010).



a) Secção transversal



b) Secção longitudinal

Figura 3.6 - Secções transversal e longitudinal da fita Ag/BSCCO (Santos, D., 2002).

Como pode ver-se na figura 3.6 a), na secção transversal da fita, o núcleo cerâmico ocupa apenas uma pequena fracção da espessura da fita. Na figura 3.6 b) é apresentada a secção longitudinal da fita supercondutora, onde se verifica uma regularidade dos materiais ao longo do comprimento.

O preço elevado da fita resulta da quantidade significativa de prata que a tecnologia necessita. O preço difere consoante a corrente crítica: uma fita de 109 A de corrente crítica tem o custo de 183 €/kA.m (dados provenientes do fabricante Innova Superconductor Technology Co., Ltd). Em termos comparativos, o cobre apresenta um custo médio de 39,1 €/kA.m.

3.1.2.2 Supercondutores de alta temperatura de segunda geração (2G) – YBCO

O YBCO-123 é normalmente usado na forma de blocos, principalmente nas máquinas eléctricas. Contudo, actualmente, é também usado em formato de fitas, neste caso, ditas de segunda geração. Os materiais de segunda geração suportam campos magnéticos aplicados e

correntes críticas superiores (em relação às de primeira geração) sem que a supercondutividade seja destruída.

O método de fabrico das fitas de segunda geração é composto por quatro camadas como ilustra a figura 3.7. A cada uma das camadas está associado um processo:

1. Preparação do substrato metálico
2. Preparação e aplicação das camadas buffer
3. Preparação e aplicação do material SAT e posterior tratamento térmico
4. Preparação e aplicação de camadas estabilizantes e de isolamento

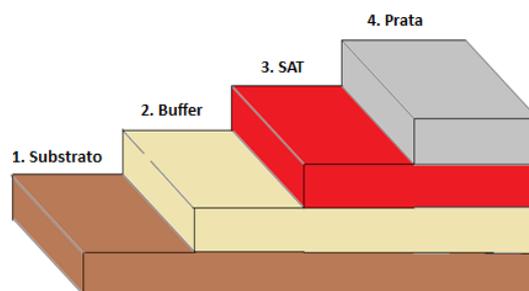


Figura 3.7 – As quatro camadas para a construção das fitas 2G

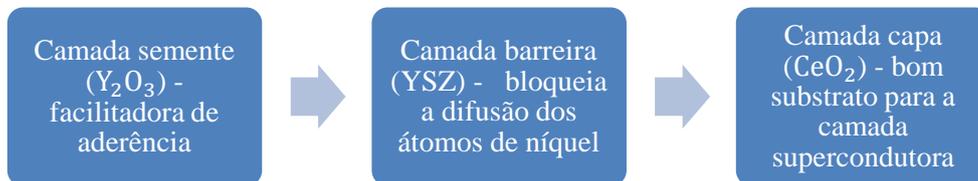
1. Preparação do substrato metálico

Um dos métodos de fabrico do substrato utilizado é conhecido por RABiTS (*Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrate*), sendo empregue por fabricantes como a *American Superconductor* (AMSC). Este processo envolve a texturização de uma liga de níquel-tungsténio através da laminagem e aquecimento da mesma, de forma a alinhar os seus átomos no sentido longitudinal da fita. O substrato resultante fica assim preparado para receber a subsequente camada. Em alternativa, outros fabricantes como a *Super Power* (SP) recorrem a um outro método, utilizando o substrato metálico sem texturização.

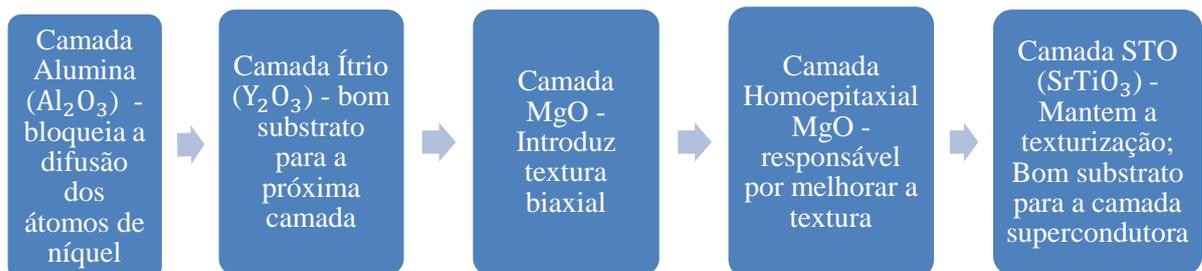
A principal vantagem da primeira alternativa é o facto de se poder utilizar qualquer liga metálica no substrato, enquanto no segundo método se está limitado a uma superliga, conhecida como Hastelloy, que é uma liga de alto desempenho por ser altamente resistente à corrosão.

2. Preparação e aplicação das camadas buffer

No caso das fitas AMSC, a implantação buffer é feita por pulverização pela seguinte ordem:



Em relação às fitas SP, devido ao substrato sem texturização, a pulverização torna-se insuficiente. Assim, é necessário aplicar-se uma técnica chamada Deposição Assistida por Feixe de Iões (*Ion Beam Assisted Deposition* - IBAD), que consiste na combinação de pulverização com deposição de iões favorecendo a texturização das camadas.



3. Preparação e aplicação do material SAT e posterior tratamento térmico

Na deposição da camada seguinte, a supercondutora, o processo também depende do fabricante. Para as fitas AMSC é utilizado um método chamado Deposição Organometálica de Trifluoroacetato (*Trifluoroacetate Metal Organic Deposition* - TFS-MOD): A camada supercondutora é formada quimicamente pela deposição de metal precursor, que é depois pirolisado. No caso das fitas SP, o supercondutor é depositado através de um método chamado Deposição Química de Vapores Organometálicos (*Metal-Organic Chemical Vapour Deposition* - MOCVD): Um vapor químico é depositado no substrato e subsequentemente pirolisado, dando origem à camada de YBCO.

4. Preparação e aplicação de camadas estabilizantes e de isolamento

Por fim, de forma a proteger a camada supercondutora, uma camada de prata é adicionada por galvanização, fornecendo também baixa resistividade de contacto eléctrico com a camada

SAT. É possível acrescentar ainda um reforço metálico extra, de forma a proporcionar estabilidade mecânica, afastando a camada supercondutora da superfície da fita, protegendo-a assim dos esforços mecânicos.

As figuras 3.8 e 3.9 ilustram o diagrama das camadas das fitas supercondutoras de alta temperatura de segunda geração de ambos os fabricantes.

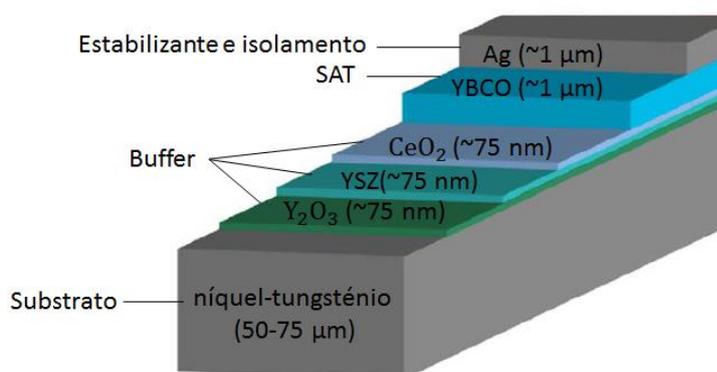


Figura 3.8 - Diagrama das camadas da fita 2G do fabricante AMSC através do método RABiTS/MOD. Adaptado de (Fleshler, S., 2009).

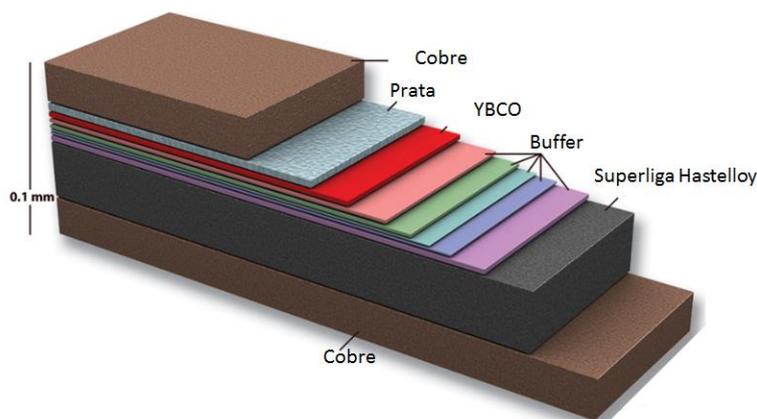


Figura 3.9 - Diagrama das camadas da fita 2G do fabricante SP. Adaptado de (<http://www.magnet.fsu.edu/mediacenter/publications/flux/vol3issue2/sctape.html>).

3.1.3 Perdas nos supercondutores

Os materiais do tipo II, quando se apresentam sob um regime alternado sinusoidal e simultaneamente no estado misto, têm perdas eléctricas associadas. A estas perdas chamam-se perdas AC, e podem subdividir-se em perdas por magnetização e por corrente de transporte.

As perdas por magnetização resultam da existência de uma densidade de fluxo magnético variável no tempo, que induz forças electromotrizes na matriz condutora onde está inserido o

material supercondutor. Estas forças electromotrizes provocam histerese magnética e perdas por correntes de Foucault no material.

As perdas por corrente de transporte resultam da corrente eléctrica transportada no supercondutor, e da sua interacção com o campo de indução magnética variável. Este campo resulta da penetração de fluxo no interior do supercondutor.

Os sistemas de potência que utilizam a tecnologia supercondutora de alta temperatura estão normalmente no estado misto, apresentando assim perdas associadas.

3.2 Materiais magnéticos

A magnetização é uma propriedade de toda a matéria, apesar de os seus efeitos macroscópicos serem apenas detectáveis nos materiais magnéticos. Assim, podem definir-se materiais magnéticos como materiais que, sob a acção de um campo magnético, são capazes de produzir um campo de indução magnética no seu volume e no espaço que os envolve, exibindo capacidade de se magnetizar. À escala microscópica, o magnetismo resulta do movimento de *spin* dos electrões e do movimento orbital destes em torno do núcleo, dando origem a correntes eléctricas, criando um momento magnético (**m**), como ilustra esquematicamente a figura 3.10.

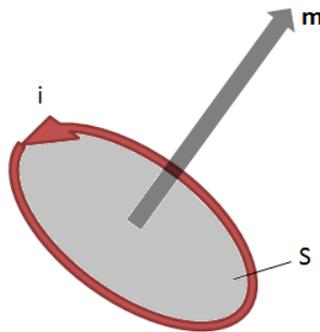


Figura 3.10 - Momento magnético.

No vazio, a relação entre o campo magnético e o campo de indução magnética é:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.3)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vazio e vale $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$.

Na presença de um material magnético, o campo de indução magnética vem na forma

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.4)$$

em que o vector magnetização **M** é o momento magnético por unidade de volume. A magnetização pode ser dada também pela expressão

$$\mathbf{M} = \chi_m \cdot \mathbf{H} \quad (3.5)$$

em que χ_m representa a susceptibilidade magnética do material, que se define como a resposta intrínseca de um dado material à acção de um campo magnético aplicado.

Rearranjando as equações anteriores, obtemos a expressão:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (3.6)$$

em que μ_r representa a permeabilidade magnética relativa do material (que no vazio é 1), e μ representa a permeabilidade absoluta do material, medida em $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$.

3.2.1 Materiais ferromagnéticos

Sob a acção de um campo magnético aplicado, os materiais exibem diferentes respostas magnéticas, consoante a sua própria estrutura, podendo ser classificados em:

- Diamagnéticos
- Paramagnéticos
- Ferromagnéticos
- Antiferromagnéticos
- Ferrimagnéticos

Para efeitos de estudo do transformador, serão apenas explorados os materiais ferromagnéticos.

Os materiais ferromagnéticos exibem uma forte magnetização espontânea resultante do alinhamento em paralelo do spin de electrões de átomos vizinhos. Este alinhamento ocorre dentro de pequenas zonas do material, chamadas domínios magnéticos. Embora nestes domínios se verifique uma magnetização intensa mesmo na ausência de campos externos aplicados, cada um adopta uma direcção e sentido de magnetização aleatórios. Desta forma, macroscopicamente, o material encontra-se desmagnetizado.

3.2.1.1 Histerese magnética

Os materiais magnéticos podem ser classificados segundo a facilidade de magnetização e, por conseguinte, pela área do seu ciclo de histerese. Desta forma, podem ser materiais magnéticos macios (MMM) os que exibem ciclos com áreas estreitas ou materiais magnéticos duros (MMD) que exibem ciclos com áreas largas.

A área do ciclo de histerese é uma medida das perdas magnéticas por unidade de volume do material e por ciclo, pelo que a minimização destas para o núcleo dos transformadores é essencial, e portanto, o núcleo dos transformadores é composto por MMM. Os MMM apresentam baixos valores de campo coercivo (H_C), o que implica ciclos de histerese estreitos.

Aplicando um campo magnético externo crescente a um material ferromagnético, este responde orientando os domínios magnéticos segundo a direcção e sentido do campo, até que seja atingida a magnetização de saturação.

Ao retirar-se o campo externo, a magnetização do material volta a diminuir mas não ao ritmo inicial, observando-se que, mesmo após a ausência de campo aplicado, o material exhibe uma certa magnetização, dita remanescente (densidade de fluxo remanescente). A este fenómeno chama-se histerese magnética. Medindo a indução magnética no material em função do campo magnético aplicado, obtém-se a chamada curva de magnetização do material.

A curva de primeira magnetização de um material ferromagnético desmagnetizado é diferente das restantes, visto o material não apresentar densidade de fluxo remanescente. Assim, antes de introduzir o ciclo de histerese magnética, torna-se relevante descrever a curva de primeira magnetização, ilustrada na figura 3.11.

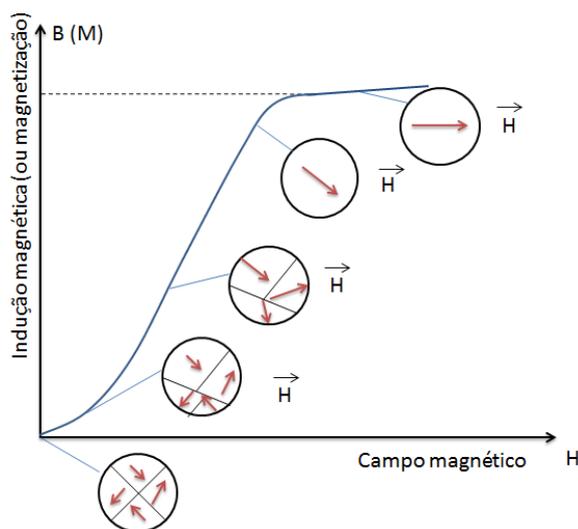


Figura 3.11 - Curva de primeira magnetização

Inicialmente, o material está no estado desmagnetizado, com os domínios a apresentar uma orientação aleatória. Ao aplicar um campo magnético externo ao material, as paredes do domínio começam a deslocar-se de forma a fazer crescer os que se encontram alinhados favoravelmente com o campo. Até um certo nível de campo, o deslocamento das paredes dos domínios é reversível, isto é, retirando o campo externo, o material volta ao estado desmagnetizado. Após um certo nível de campo aplicado, os domínios começam a rodar para essa direcção e as suas paredes continuam a deslocar-se, ganhando novos pontos de ancoragem.

Os movimentos das paredes não são contínuos, sendo conhecidos como saltos de Barkhausen. Este nível de campo (de intensidade média) é o que exibe maior permeabilidade magnética.

Para campos de intensidade elevada, termina o deslocamento das paredes, continuando o dos domínios até estarem alinhados com o campo aplicado, atingindo a zona de saturação técnica. Atingida esta região, se se continuar a aumentar o campo, a curva torna-se praticamente linear, com declive igual à permeabilidade magnética do vazio.

3.2.1.2 Ciclo de histerese magnética

Um material completamente desmagnetizado é magnetizado até atingir a saturação, como já explicado, pela curva de primeira magnetização. Se em seguida se diminuir o campo aplicado, a magnetização do material não retorna pelo mesmo caminho, mas descreve um novo, isto é, existe um atraso do campo de indução (B) em relação ao campo aplicado.

Quando o campo aplicado é nulo, o material ainda se encontra magnetizado, apresentando um campo de indução remanescente (B_r). Para o desmagnetizar é necessário aplicar um campo magnético de sentido contrário e aumentá-lo até um certo valor. A este valor de campo chama-se campo coercivo ($-H_c$).

Continuando a diminuir o campo aplicado, chega-se novamente à zona de saturação, desta vez com sentido contrário ao inicial. Voltando a aumentar o campo até este se anular, o material volta a apresentar uma nova magnetização, desta vez no sentido contrário ao inicial. Ao aumentar o campo, este irá descrever uma curva fechada que corresponde ao ciclo de histerese do material, ilustrado na figura 3.12.

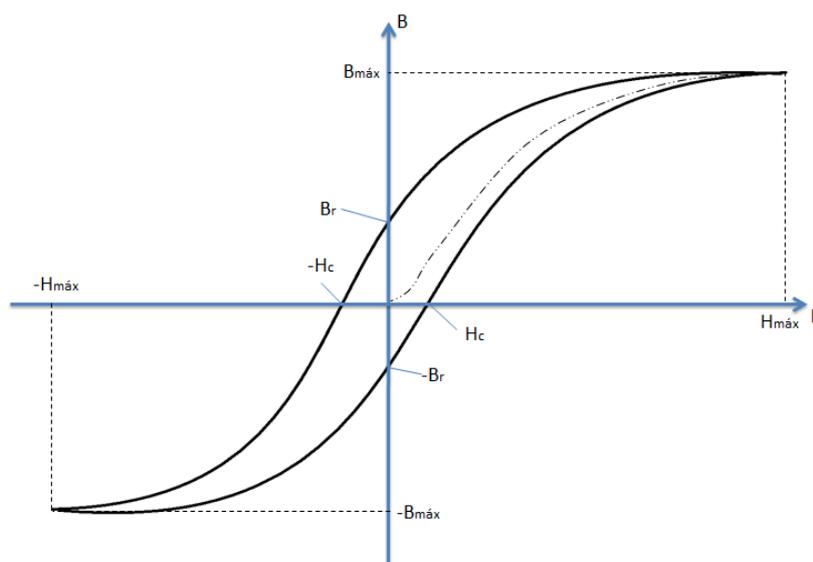


Figura 3.12 - Ciclo de histerese magnética.

3.2.1.3 Perdas magnéticas

A variação de indução magnética num material ferromagnético provoca sempre dissipação de energia sob a forma de calor. Estas perdas magnéticas subdividem-se em três fracções: as perdas por histerese, as perdas por correntes de Foucault clássicas e as perdas por correntes de Foucault excedentes.

Uma outra forma de as classificar consiste na sua subdivisão em perdas estáticas e perdas dinâmicas, em que, nas primeiras se incluem as perdas por histerese, e nas últimas os outros dois tipos de perdas.

3.2.1.3.1 Perdas por histerese

As perdas por histerese num material são proporcionais à área do ciclo de histerese, obtido em regime quasi-estático, dependendo também do volume do material.

Para campos uniformes e secção constante podem ser calculadas por:

$$P_h = Vol \cdot f \cdot \oint HdB \quad (3.7)$$

Se o ciclo de histerese for obtido em regime dinâmico, com a utilização da expressão 3.7 obtém-se o somatório de todas as perdas no material magnético (histerese, correntes de Foucault clássicas e excedentes).

A explicação das perdas por histerese ainda não é consensual. Uma das justificações possíveis advém do processo de aniquilação e formação de paredes de domínio, originando perdas irreversíveis de energia. (Pronto, A., 2011)

3.2.1.3.2 Perdas por correntes de Foucault clássicas

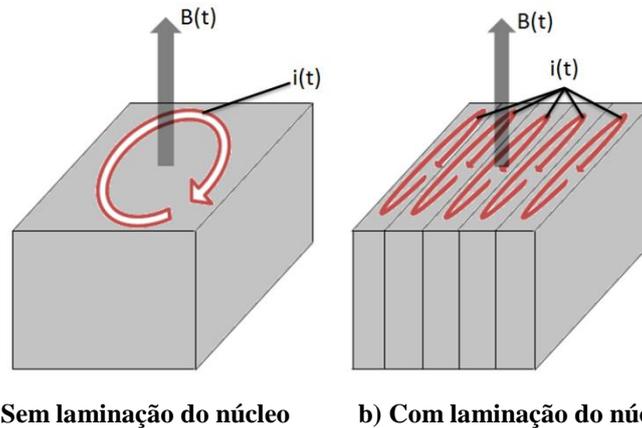
As perdas por correntes de Foucault clássicas resultam da variação do campo de indução magnética e do facto do material apresentar condutividade eléctrica. A variação de campo de indução magnética dá origem a uma força electromotriz induzida, de onde resulta uma corrente, à qual se dá o nome de corrente de Foucault.

Este tipo de perdas pode ser calculado por:

$$P_{cl} = \frac{\pi^2 \cdot e^2 \cdot B_m^2 \cdot f^2}{6 \cdot \rho \cdot d_m} \quad (3.8)$$

onde e é a espessura da chapa, B_m é a indução máxima no material, f é a frequência de operação, ρ é a resistividade eléctrica do material e d_m é a densidade do material em $kg \cdot m^{-3}$.

Estas perdas podem ser minimizadas escolhendo um material com maior resistividade eléctrica e diminuindo a espessura das suas chapas, como exemplificado na figura 3.13.



a) Sem laminação do núcleo b) Com laminação do núcleo

Figura 3.13 - Correntes de Foucault com e sem laminação do núcleo.

3.2.1.3.3 Perdas por correntes de Foucault excedentes

Considerando a totalidade das perdas do material (em regime dinâmico), e ao medir-se a parcela de perdas por histerese (regime quasi-estático) e calculando as perdas por correntes de Foucault clássicas, resta uma parcela de perdas, às quais se chama perdas excedentes, isto é:

$$P_{exc} = P_t - P_h - P_{cl} \quad (3.9)$$

Estas perdas resultam do movimento em larga escala das paredes de domínios e respectiva rotação dos domínios magnéticos que ocorre na zona do joelho da curva de magnetização.

Para minimizar este tipo de perdas, a solução passa pela utilização de materiais com menor tamanho de grão, uma vez que resultará numa menor distância percorrida pelas paredes. No entanto há a considerar que um menor tamanho do grão origina maiores perdas por histerese, devido ao aumento dos pontos de ancoragem.

3.3 Transformador

Um transformador é essencialmente uma máquina estática de transformação de tensão e corrente, que transfere energia eléctrica de um circuito eléctrico para outro. É constituído essencialmente por dois componentes: os enrolamentos de material condutor e o núcleo de material magnético macio.

O princípio físico elementar de um transformador é a existência de indução mútua entre dois circuitos eléctricos que se encontram ligados magneticamente através de um fluxo magnético comum, chamado fluxo principal.

Para efeitos de estudo do transformador, serão apenas explorados os transformadores monofásicos. Na figura 3.14 apresenta-se um esquema de um transformador monofásico e as respectivas grandezas envolvidas.

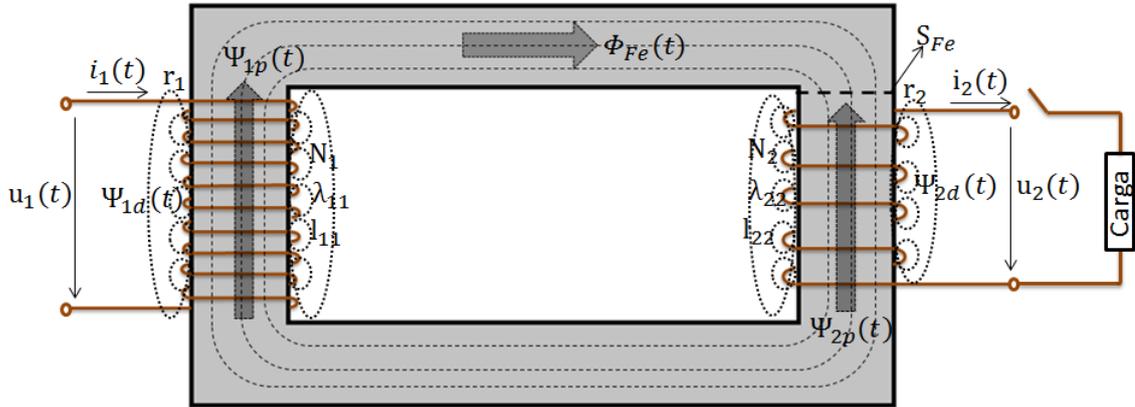


Figura 3.14 - Esquema do transformador monofásico e grandezas envolvidas

3.3.1 Equações gerais do transformador e esquema equivalente de Steinmetz

As equações gerais que regem o funcionamento do transformador podem ser traduzidas através de um esquema eléctrico equivalente, desenvolvido por Charles Proteus Steinmetz, permitindo analisar o seu comportamento de forma mais simples. Este esquema foi desenvolvido com base na lei geral de indução, também conhecida como lei de Faraday. Esta afirma que o fluxo magnético variável no tempo, ao atravessar uma bobina de N espiras, induz nesta uma força electromotriz aos seus terminais.

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.10)$$

Aplicando esta lei ao primário e secundário do transformador obtém-se, respectivamente:

$$\begin{cases} u_1 = r_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ -u_2 = r_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{cases} \quad (3.11)$$

Ainda, considerando que os fluxos totais ligados com o primário e secundário são

$$\begin{cases} \Psi_1 = l_{11} i_1 + \lambda_{11} i_1 + L_M i_2 \\ \Psi_2 = l_{22} i_2 + \lambda_{22} i_2 + L_M i_1 \end{cases} \quad (3.12)$$

(onde L_M é o coeficiente de indução mútua e se relaciona com os coeficientes de auto-indução principais através de $L_M = \frac{N_2}{N_1} l_{11} = \frac{N_1}{N_2} l_{22}$) obtém-se as equações gerais instantâneas do transformador, considerando que o seu núcleo não exhibe saturação nem histerese magnética e se caracteriza por uma permeabilidade magnética constante.

$$\begin{cases} u_1 = r_1 i_1 + l_{11} \frac{di_1}{dt} + \lambda_{11} \frac{di_1}{dt} + \frac{N_2}{N_1} l_{11} \frac{di_2}{dt} \\ -u_2 = r_2 i_2 + l_{22} \frac{di_2}{dt} + \lambda_{22} \frac{di_2}{dt} + \frac{N_1}{N_2} l_{22} \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (3.13)$$

Em regime alternado sinusoidal, obtém-se

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = r_1 \bar{I}_1 + j\omega \lambda_{11} \bar{I}_1 + j\omega l_{11} \bar{I}_{10} \\ -\bar{U}_2 = r_2 \bar{I}_2 + j\omega \lambda_{22} \bar{I}_2 + j\omega \frac{N_2}{N_1} l_{11} \bar{I}_{10} \end{cases} \quad (3.14)$$

Onde $\bar{I}_{10} = \bar{I}_1 + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2$ é a corrente de magnetização (referida ao primário) que representa uma corrente fictícia que, se circulasse sozinha no primário, criaria a mesma força magnetomotriz que as correntes do primário e secundário.

Considerando $\frac{N_1}{N_2} = m$ (chamada razão de transformação) e com o auxílio das equações anteriores é possível obter o esquema equivalente de Steinmetz do transformador (figura 3.15). Este esquema diz-se reduzido ao primário pois todos os parâmetros do primário aparecem com o seu verdadeiro valor mas os do secundário são substituídos por imagens vistas do primário.

$$\begin{aligned} \bar{U}'_2 &= -m\bar{U}_2 & \bar{I}'_2 &= -\frac{1}{m}\bar{I}_2 \\ X'_2 &= m^2 X_2 & r'_2 &= m^2 r_2 \\ \bar{Z}'_c &= m^2 \bar{Z}_c \end{aligned}$$

Tendo em conta as perdas magnéticas, pode ainda acrescentar-se uma resistência em série com a bobina do ramo transversal. Esta resistência é fictícia e é chamada *resistência de perdas no ferro*, em que no esquema, dá perdas de Joule fictícias iguais às verdadeiras perdas magnéticas totais.

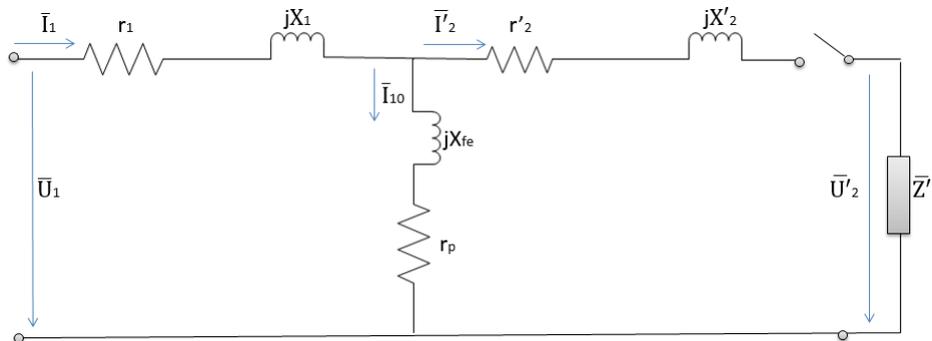


Figura 3.15 - Esquema equivalente de Steinmetz reduzido ao primário.

Outra forma de apresentar o esquema equivalente de Steinmetz é reduzido ao secundário (figura 3.16), isto é, com as verdadeiras grandezas do secundário e imagens das primárias reduzidas ao secundário.

$$\begin{aligned} \bar{U}''_1 &= -\frac{1}{m} \bar{U}_1 & \bar{I}''_1 &= -m \bar{I}_1 & X''_1 &= \frac{1}{m^2} X_1 \\ r''_1 &= \frac{1}{m^2} r_1 & \bar{I}_{20} &= m \bar{I}_{10} = \frac{F_m}{N_2} & X''_{fe} &= \frac{1}{m^2} X_{fe} & r''_p &= \frac{1}{m^2} r_p \end{aligned}$$

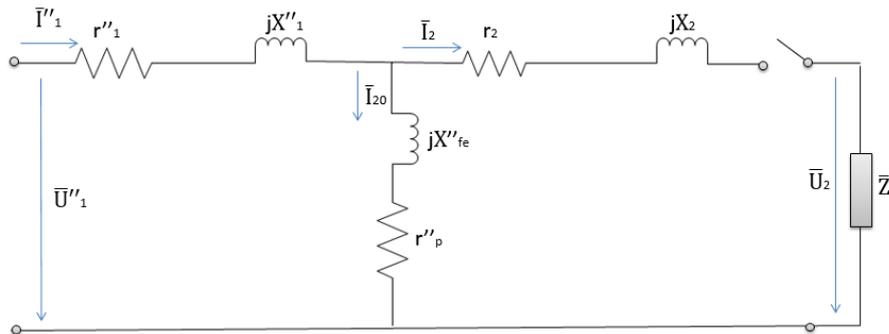


Figura 3.16 - Esquema equivalente de Steinmetz reduzido ao secundário.

3.3.2 Ensaios do transformador

Na prática, a determinação dos parâmetros fundamentais do transformador, resistências e reactâncias, faz-se através de dois ensaios: um com o transformador em curto-circuito e outro com o transformador em vazio.

Os ensaios podem ser feitos em qualquer um dos enrolamentos do transformador. Quando feito a partir de um dado enrolamento, todas as grandezas se referirão ao mesmo.

3.3.2.1 Ensaio do transformador em curto-circuito

O ensaio em curto-circuito consiste em manter os terminais do secundário em curto-circuito e, em seguida, aplicar ao primário uma tensão tal que provoque a circulação de corrente nominal no secundário I_{ecc} .

Como a tensão de curto-circuito é muito mais pequena que a nominal, a magnetização do ferro (que é proporcional à tensão aplicada) é desprezável face à que existe em condições nominais. Sabendo ainda que a impedância transversal é muito maior que a impedância do ramo série, pode admitir-se que a corrente de magnetização é praticamente nula. Assim, o ramo transversal é desprezável e o esquema equivalente de Steinmetz simplificado, está apresentado na figura 3.17.

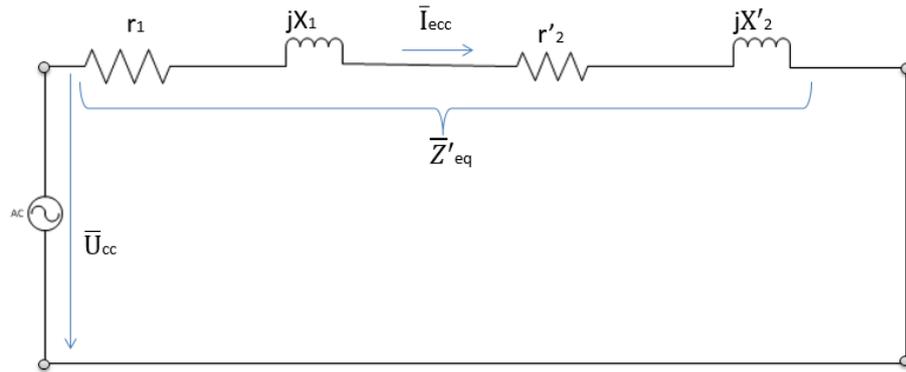


Figura 3.17 - Esquema equivalente de Steinmetz simplificado para o ensaio em curto-circuito.

Para a realização do ensaio em curto-circuito são necessários: um voltímetro (V), dois amperímetros (A) e um wattímetro (W). A montagem e medições inerentes ao ensaio em curto-circuito são feitas de acordo com a figura 3.18.

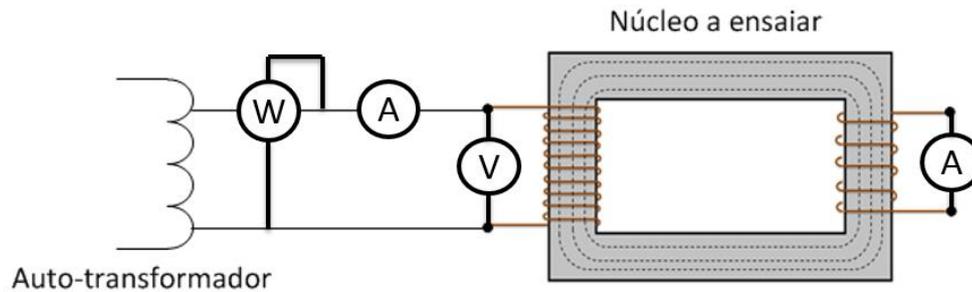


Figura 3.18 – Montagem para o ensaio em curto-circuito.

O argumento da impedância de curto-circuito \bar{Z}'_{eq} , pode ser determinado conhecendo-se o factor de potência (FP) do circuito, isto é:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{cc}}{U_{efcc} \cdot I_{efcc}} \quad (3.15)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{cc}}{U_{efcc} \cdot I_{efcc}}$$

Assim, facilmente se obtém a amplitude complexa da impedância:

$$\bar{Z}'_{eq} = \frac{U_{efcc}}{I_{efcc}} \angle \theta \quad (3.16)$$

Chegando finalmente aos valores da resistência e reactância de cada um dos enrolamentos:

$$r_1 = r'_2 = \frac{|\bar{Z}'_{eq}|}{2} \cos \theta$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{|\bar{Z}'_{eq}|}{2} \text{sen } \theta$$

É ainda possível obter a tensão de curto-circuito por unidade (η_{cc}):

$$\eta_{cc} = \frac{U_{efcc}}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (3.17)$$

3.3.2.2 Ensaio do transformador em vazio

O ensaio em vazio consiste em, com o secundário em vazio ($I_2 = 0$), aplicar ao primário a tensão nominal U_{1n} , no qual se observa facilmente no esquema equivalente que toda a corrente do circuito passa pelo ramo de magnetização.

Como a corrente de magnetização (I_{10}) é normalmente muito menor que a nominal (I_n), e a impedância do primário é muito inferior à do núcleo, a queda de tensão do primário pode ser desprezada. Desta forma, podemos aproximar o esquema do transformador em vazio ao presente na figura 3.19.

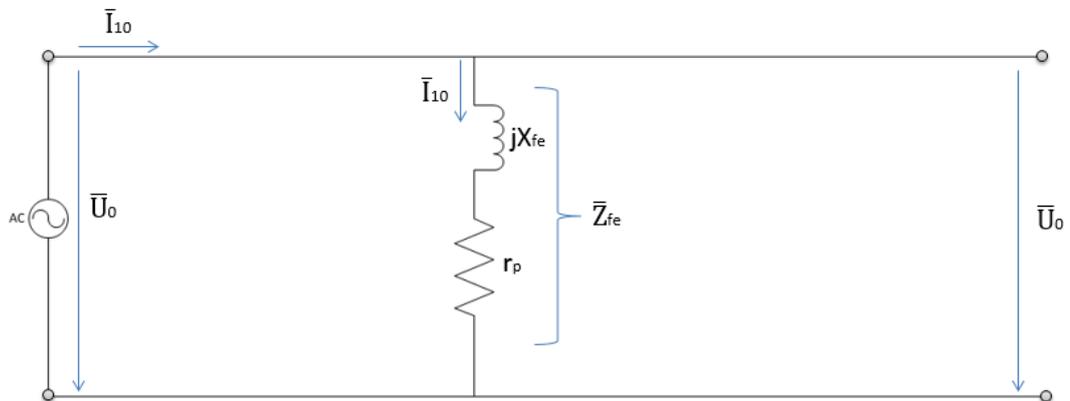


Figura 3.19 - Esquema equivalente de Steinmetz simplificado para o ensaio em vazio.

Para a realização do ensaio em vazio são necessários: dois voltímetros (V), um amperímetro (A) e um wattímetro (W). A montagem e medições inerentes ao ensaio em vazio são feitas de acordo com a figura 3.20.

A figura 3.20 mostra a montagem inerente ao ensaio em vazio.

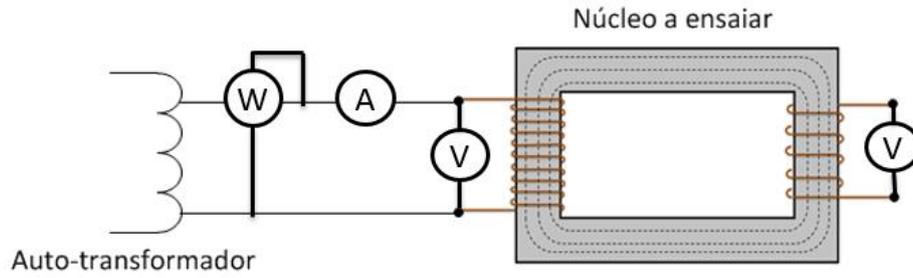


Figura 3.20 - Montagem para o ensaio em vazio.

O ângulo da impedância do ensaio em vazio pode ser determinado conhecendo-se o factor de potência (FP) do circuito, isto é:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_0}{U_{ef0} \cdot I_{ef10}} \quad (3.18)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_0}{U_{ef0} \cdot I_{ef10}}$$

Onde facilmente se obtém a amplitude complexa da impedância:

$$\bar{Z}_{fe} = \frac{U_{ef0}}{I_{ef10}} \angle \theta \quad (3.19)$$

Obtendo-se finalmente os valores da resistência e reactância de cada um dos enrolamentos:

$$r_p = |\bar{Z}_{eq}| \cos \theta$$

$$X_{fe} = |\bar{Z}_{eq}| \sin \theta$$

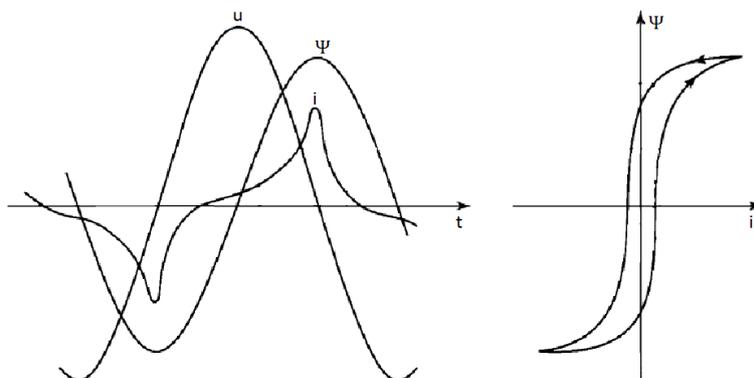
4 Dimensionamento

Neste capítulo é apresentado o dimensionamento detalhado do transformador. A expressão fundamental para o dimensionamento do núcleo é dada por:

$$\frac{U_{ef}}{N} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot S_{fe} \cdot f \cdot B_m \quad (4.1)$$

e permite obter a tensão por espira, para uma certa densidade de fluxo magnético máximo B_m , uma frequência de trabalho f , e uma secção do núcleo ferromagnético S_{fe} .

O valor a utilizar em B_m não corresponde ao campo de indução máximo do núcleo ferromagnético, mas a um valor próximo ao cotovelo da curva de magnetização. A razão de se escolher um valor menor é evitar a saturação do material, que induz efeitos indesejáveis como a distorção da corrente e o atraso do fluxo em relação à corrente (figura 4.1).



a) Tensão aplicada no enrolamento, corrente e fluxo magnético

b) Curva de histerese correspondente

Figura 4.1 - Curva de magnetização do transformador. Adaptado de (Fitzgerald, A., 2003)

Quando existe saturação do núcleo ferromagnético, apesar de o fluxo ser uma onda sinusoidal, a corrente não o é. Isto acontece devido à introdução de componentes de alta frequência (harmónicas) causadas pela saturação do núcleo do transformador. Quando o núcleo está próximo de atingir a saturação, é necessária uma quantidade de corrente maior para produzir um pequeno aumento no fluxo magnético.

Ainda é possível reparar na defasagem entre a corrente e o fluxo, o que resulta do facto de existir um atraso entre a excitação e a resposta do material. Isto é facilmente observável no ciclo de histerese pois este não passa pela origem do referencial, e desta forma, a corrente não passa por zero ao mesmo tempo que o fluxo.

4.1 Relação entre a potência do transformador e a secção do núcleo ferromagnético

A potência e a secção do núcleo de um transformador estão intimamente relacionadas. O objectivo é a minimização da secção do núcleo do transformador, para uma determinada potência. No caso do presente trabalho, e para aproveitar o núcleo disponível em laboratório, a potência foi maximizada.

Pela expressão fundamental do dimensionamento do transformador (expressão 4.1) e com algumas deduções, é possível obter a expressão desejada que relaciona a potência aparente, S , com a secção (por simplicidade, aproximou-se o resultado de $\frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}}$ a 4,44):

$$S = U \cdot I = 4,44 \cdot S_{fe} \cdot f \cdot B_m \cdot I \cdot N \quad (4.2)$$

A corrente que flui por unidade de área do condutor a_c , isto é, a densidade de corrente, é dada pela equação $J = \frac{I}{a_c}$. Sabendo que $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$, e considerando que a densidade de corrente é igual para ambos os enrolamentos, obtém-se $N_1 \cdot a_1 = N_2 \cdot a_2$. Desta forma, a área que o condutor ocupa na janela é dada por:

$$A_c = N_1 \cdot a_{c1} + N_2 \cdot a_{c2} = \frac{2 \cdot N \cdot I}{J} \quad (4.3)$$

Sabendo que é possível relacionar a área disponível da janela A_j , com a área que o condutor nela ocupa A_c , por um coeficiente, K_u (coeficiente de utilização da janela), então:

$$A_c = K_u \cdot A_j \quad (4.4)$$

A partir das equações 4.3 e 4.4 chega-se à seguinte expressão:

$$I = \frac{J \cdot K_u \cdot A_j}{2 \cdot N} \quad (4.5)$$

Substituindo na expressão 4.2 e reescrevendo em ordem à área do ferro, temos:

$$S_{fe} = \frac{S}{2,22 \cdot f \cdot B_m \cdot J \cdot K_u \cdot A_j} \quad (4.6)$$

De onde, o produto entre a secção efectiva do núcleo (S_{fe}) e a área da janela (A_j) do transformador é conhecido como produto de área, A_p (*area product*).

$$A_p = S_{fe} \cdot A_j \quad (4.7)$$

Estes três parâmetros (A_p , S_{fe} , A_j) são tabelados pelos fabricantes dos núcleos e estão disponíveis para diferentes formatos, como os do tipo EI, UI, LL, EE, entre outros. Estes valores podem ser consultados em (McLyman, C., 2004).

Usando a notação do produto de área, pode reescrever-se a expressão 4.6:

$$A_p = \frac{S}{2,22 \cdot f \cdot B_m \cdot J \cdot K_u} \quad (4.8)$$

É possível também relacionar, ainda que não de uma forma totalmente linear, a secção do núcleo (S_{fe}) com a área da janela (A_j), através de um coeficiente dado por K_j .

Este coeficiente varia para diferentes núcleos, podendo assumir valores próximos de 0,8 para núcleos do tipo EI e valores próximos de 2,8 para núcleos do tipo UI, em foco nesta dissertação. Tem-se então que:

$$A_j = K_j \cdot S_{fe} \quad (4.9)$$

Substituindo a expressão 4.9 na 4.6 podemos então chegar à equação final que permite obter a secção necessária do núcleo.

$$S_{fe} = \sqrt{\frac{S}{2,22 \cdot f \cdot B_m \cdot J \cdot K_u \cdot K_j}} \quad (4.10)$$

As expressões encontradas na literatura que relacionam a secção do núcleo com a potência são:

- Para núcleos do tipo UI (Chen, X., 2008)

$$d = 55 * \sqrt[4]{S} \quad (4.11)$$

$$S_{fe} = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * k_f * k_l \quad (4.12)$$

em que d é o diâmetro da secção circular do núcleo (mm), S_{fe} é a área da secção do núcleo (mm^2), S a potência aparente (kVA), e k_l e k_f representam os coeficientes de empilhamento e preenchimento, respectivamente, explicados mais à frente.

- Para núcleos do tipo EI (Martignoni, A., 1991)

$$S_{fe} = 7,5 \sqrt{\frac{S}{f}} \quad (4.13)$$

em que S é dado em VA, e S_{fe} em cm^2 .

4.2 Coeficiente de utilização da janela, K_u

O coeficiente de utilização da janela, K_u , representa a quantidade de condutor que está presente na área da janela do transformador, sendo influenciado principalmente por:

- Área de isolante do condutor, S1 (figura 4.2 a)).
- Factor de preenchimento devido à forma do condutor, S2 (figura 4.2 b)).
- Área disponível para o enrolamento, considerando margens requeridas para a configuração das bobinas e a espessura das camadas isolantes, S3 (Figura 4.2 c)).
- Isolamento entre múltiplos enrolamentos secundários, S4. Por cada enrolamento secundário adicional, S4 deve ser reduzido entre 5% a 10%.

Tendo em conta os factores acima enunciados, uma boa aproximação para o coeficiente de utilização da janela é de 0,4 (McLyman, C., 2004), em que:

$$S1 = \frac{\text{Área transversal do condutor}}{\text{Área transversal do cabo}} = 0,855^a$$

$$S2 = \frac{\text{Área total transversal de cabo no enrolamento}}{\text{Área efectivamente utilizada da janela}} = 0,61^b$$

$$S3 = \frac{\text{Área efectivamente utilizada da janela}}{\text{Área da janela}} = 0,75$$

$$S4 = \frac{\text{Área efectivamente utilizada da janela}}{\text{Área efectivamente utilizada da janela + isolante}} = 1^c$$

Então, tem-se que:

$$K_u = S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \quad (4.14)$$

A figura 4.2 esquematiza S1, S2 e S3.

^a Valor de referência para os cabos tipo #20 AWG

^b Teoricamente, este factor pode atingir os 0,785 ou até mesmo 0,907. Contudo, na realidade tem de considerar-se uma margem de erro devido à impossibilidade de enrolamento manual na perfeição.

^c Considera-se que não tem múltiplos enrolamentos secundários

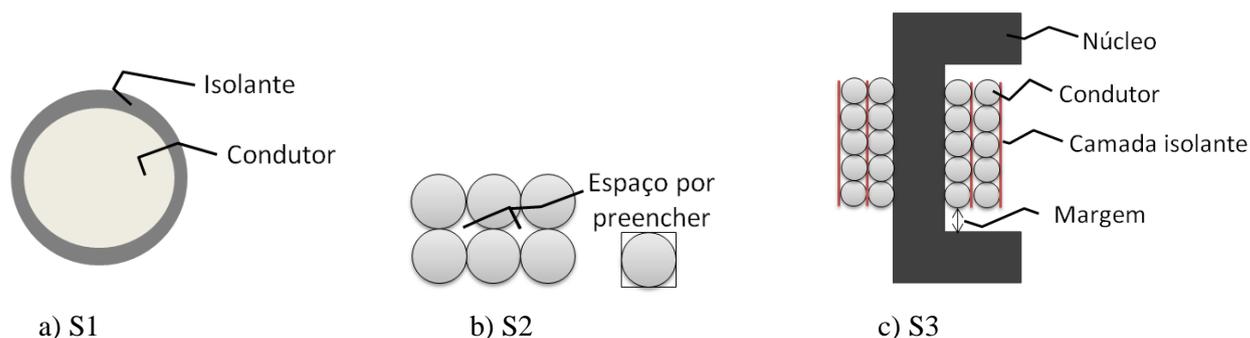


Figura 4.2 - Coeficiente de utilização K_u

4.3 Enrolamentos

Existem diversas formas de implementação dos enrolamentos nos transformadores: em solenóide, em panqueca simples ou dupla, ou utilizando condutores transpostos, formando os chamados cabos de Roebel.

4.3.1 Comparação dos enrolamentos tipo panqueca e solenoidal

Os enrolamentos do tipo panqueca e solenoidal apresentam vantagens e desvantagens associadas. Ambos os enrolamentos estão representado na figura 4.3.

Primeiro que tudo, os enrolamentos em panqueca são mais fáceis de enrolar do que os solenoidais. Além disso, em caso de defeito, é possível substituir apenas a panqueca defeituosa visto que o enrolamento total é composto por várias panquecas (no caso dos enrolamentos solenoidais é necessário substituir todo o enrolamento).

Os enrolamentos em panqueca são também mais vantajosos no que diz respeito a tensões mais elevadas. Nestas condições, os solenoidais apresentam um desempenho inferior em termos de isolamento e distribuição de picos de tensão, sendo, portanto, normalmente utilizados em forma de panqueca no lado da alta tensão. (Kim, S.-H., 2005)

No entanto, os enrolamentos em panqueca apresentam maiores perdas devido às junções resistivas entre as panquecas (Lee, S., 2002). Outra desvantagem associada aos enrolamentos em panqueca, no caso de serem em fita supercondutora, tem a ver com as perdas AC, que advêm de uma maior densidade de campo magnético perpendicular à superfície da fita supercondutora, o que faz com que apresentem também um valor de corrente crítica inferior, comparado com o da solenoidal). (Baldwin, T., 2003)



a) Enrolamento em panqueca



b) Enrolamento em solenóide

Figura 4.3 - Tipos de enrolamentos (http://www.best-b2b.com/Products/545/570-1/selfbonded-pancake-coil_122533.html),
(http://www.tjskl.org.cn/products/single_phase_electromagnet_solenoid_air_core_coils_for_capacitor_resistor-mpz53287a5-z509009a/showimage.html)

Recentemente, os enrolamentos de YBCO começaram a ser considerados porque apresentam maior densidade de corrente e melhores características electromagnéticas relativamente à fita BSCCO.

Com o enrolamento em panqueca, as perdas AC da fita YBCO são 40% mais elevadas do que com a fita BSCCO. Por outro lado, as perdas AC da fita YBCO são apenas 1/10 das da BSCCO quando utilizadas solenoidalmente. Para ambos os enrolamentos, as perdas AC por campos magnéticos paralelos podem ser desprezadas quando comparadas com os perpendiculares (Lim, H., 2007). Ainda segundo este autor, as perdas AC dos enrolamentos em panqueca - para ambas as fitas - são bastante superiores às dos enrolamentos em solenoidal.

4.3.2 Cabos Roebel

Os cabos ou barras de Roebel, representados na figura 4.4, são utilizados quando se pretende limitar o efeito pelicular. Os condutores que compõem o cabo são isolados entre si, ligados em paralelo e transpostos continuamente, de modo a eliminar as correntes de Foucault responsáveis por esse fenómeno. A utilização de cabos Roebel supercondutores, por exemplo em fita Bi-2223, prende-se não só com a uniformização da densidade de corrente em todos os condutores do cabo - e conseqüente diminuição de perdas AC - mas também com a necessidade de aumentar a corrente de operação para além da suportada por fitas individuais (Pina, 2010).



Figura 4.4 – Cabos de Roebel (condutores transpostos) (<http://www.gcsuperconductors.com/about-us/galleries/gcsgallery/hts-cable-and-weave-closeup>)

4.4 Coeficiente de empilhamento e coeficiente de preenchimento

Para o dimensionamento do transformador há a ter em consideração dois coeficientes: o factor de empilhamento e o factor de preenchimento.

O primeiro relaciona-se com utilização de núcleos laminados, isto é, o núcleo é composto por várias chapas de espessura fina, por forma a reduzir as correntes de Foucault. Assim, a área efectivamente disponível para o fluxo (S_{fe}) é menor que a área geométrica do núcleo (S_{geo}). À relação entre estas duas áreas dá-se o nome de factor de empilhamento (k_l), e o valores típico para as ligas cristalinas é de 95%.

$$S_{fe} = k_l \cdot S_{geo} \quad (4.15)$$

O factor de preenchimento resulta do facto de normalmente se tentar aproximar a área do núcleo à de um círculo, S_{circ} (a aproximação é feita por diferentes degraus, ou *steps*). Utiliza-se o formato circular de forma a minimizar a distância do núcleo ao enrolamento ao longo de toda a circunferência (diminuindo o fluxo de dispersão e o condutor fica enrolado de um modo mais homogéneo). É necessário, assim, multiplicar um coeficiente relativo à fracção de círculo ocupado pelo núcleo. A este factor dá-se o nome de coeficiente de preenchimento (k_f).

$$S_{fe} = k_f \cdot S_{circ} \quad (4.16)$$

A figura 4.5 exemplifica a aproximação da secção do núcleo laminado a um círculo de raio R . É ainda possível ver na tabela 4.1 a fracção de círculo ocupado para núcleos de diferentes degraus e as suas posições relativamente ao raio do círculo.

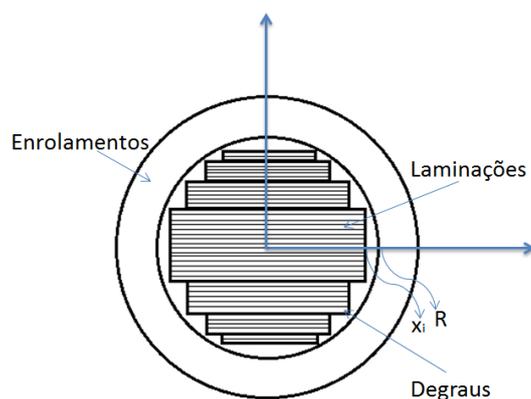


Figura 4.5 – Esquema da secção do núcleo de um transformador de 4 degraus

Tabela 4.1 - Fração da área do círculo ocupada pelo núcleo e respectivas coordenadas dos vários degraus (VECCHIO, R., 2010)

Número de degraus	Fracção do círculo ocupada	Coordenada x_i/R
1	0.6366	0.7071
2	0.7869	0.5257, 0.8506
3	0.851	0.4240, 0.7070, 0.9056
4	0.866	0.3591, 0.6064, 0.7951, 0.9332
5	0.9079	0.3138, 0.5336, 0.7071, 0.8457, 0.9494
6	0.9228	0.2802, 0.4785, 0.6379, 0.7700, 0.8780, 0.9599
7	0.9337	0.2543, 0.4353, 0.5826, 0.7071, 0.8127, 0.9002, 0.9671
8	0.9419	0.2335, 0.4005, 0.5375, 0.6546, 0.7560, 0.8432, 0.9163, 0.9723
9	0.9483	0.2164, 0.3718, 0.4998, 0.6103, 0.7071, 0.7921, 0.8661, 0.9283, 0.9763
10	0.9534	0.2021, 0.3476, 0.4680, 0.5724, 0.6648, 0.7469, 0.8199, 0.8836, 0.9376, 0.9793

Da análise da tabela 4.1 pode concluir-se que quantos mais degraus tiver o núcleo, maior é a fracção do círculo ocupada, aproximando-se assim a secção do núcleo a um círculo. A desvantagem associada ao elevado número de degraus consiste na dificuldade de implementação do núcleo.

5 Aspectos construtivos dos transformadores a ensaiar

Neste capítulo serão apresentados os aspectos construtivos dos protótipos dos transformadores construídos em laboratório, nomeadamente, um transformador convencional com enrolamentos em cobre, e outro com o mesmo enrolamento de cobre no primário mas com o secundário composto por fita SAT BSCCO. A figura 5.1 representa o protótipo do transformador com secundário composto por fita supercondutora.

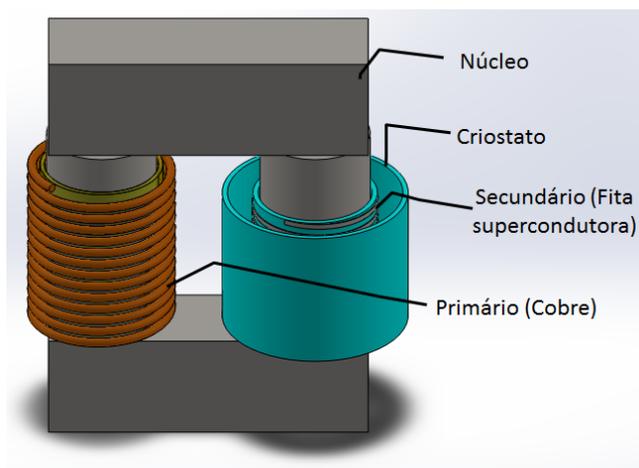


Figura 5.1 – Representação do protótipo com secundário com fita supercondutora

5.1 Núcleo ferromagnético

O núcleo ferromagnético disponível em laboratório para a construção do protótipo do transformador está representado na figura 5.2.

É composto por 106 chapas metálicas de Fe-Si de espessura 0,50 mm, montadas em paralelo e isoladas entre si. As colunas do transformador têm quatro degraus e uma secção circular de 31 cm². Aplicando o coeficiente de empilhamento de 0,95 e o coeficiente de preenchimento de 0,866 (tabela 4.1), obtém-se a secção útil de ferro de 25,5 cm². As dimensões podem ser consultadas de forma mais pormenorizada no Apêndice 1.



Figura 5.2 - Núcleo ferromagnético

5.2 Enrolamento primário

O enrolamento primário foi feito em torno de um suporte em acrílico (Apêndice 4). O condutor utilizado foi um fio de cobre esmaltado de $1,5 \text{ mm}^2$ tendo-se enrolado 347 espiras de forma solenoidal. A figura 5.3 apresenta o enrolamento desenvolvido.

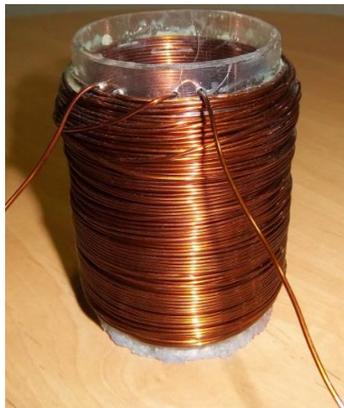


Figura 5.3 - Enrolamento primário

5.3 Enrolamento secundário

Dois enrolamentos secundários foram utilizados, um feito com material supercondutor de alta temperatura (Bi-2223), e outro em cobre.

Para o condutor SAT utilizou-se o Celeron como suporte da fita devido às suas boas propriedades térmicas e mecânicas, especialmente o baixo coeficiente de expansão/compressão térmica (Apêndice 3). No caso do enrolamento em cobre foi utilizado um suporte idêntico ao utilizado no primário. Ambos apresentam 30 espiras enroladas igualmente de forma solenoidal, e estão representados na figura 5.4.



a) Enrolamento de cobre



b) Enrolamento de fita supercondutora

Figura 5.4 - Enrolamentos secundários

5.4 Crióstato

Para o ensaio laboratorial dos transformadores, optou-se pela utilização de um crióstato para a bobina em vez de submergir todo o transformador no líquido criogénico (Apêndice 2). O crióstato, representando na figura 5.5, foi apenas utilizado no protótipo do transformador com o secundário em fita supercondutora, tendo por objectivo arrefecer a fita para temperaturas abaixo da temperatura crítica.



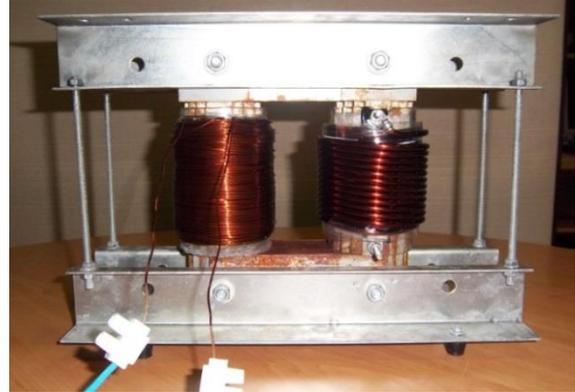
Figura 5.5 – Crióstato

5.5 Protótipo do transformador desenvolvido

Nas figuras 5.6 a) e b) estão representados os dois protótipos construídos.



a) Transformador com secundário em fita supercondutora



b) Transformador convencional

Figura 5.6 - Protótipos desenvolvidos

Houve um aproveitamento do espaço da janela do transformador com secundário em supercondutor para a utilização do crióstato de forma a facilitar no arrefecimento da fita, como se pode verificar na figura 5.6 a). No caso do transformador convencional, o espaço da janela não foi todo aproveitado. Apesar do transformador convencional ter espaço para mais enrolamentos, dada a disponibilidade de 30 espiras de fita supercondutora, houve a necessidade de igualar o número de espiras em cobre de forma a comparar os dois protótipos.

5.5.1 Potência do transformador

Utilizando a expressão que relaciona a secção do núcleo ferromagnético com a potência aparente do transformador, é possível obter a potência para a qual o transformador deve ser dimensionado de forma a tirar máximo proveito do seu núcleo. Desta forma, através da expressão 4.10, e reescrevendo-a em ordem à potência aparente obtém-se:

$$S = 2,22 \cdot S_{fe}^2 \cdot f \cdot B_m \cdot J \cdot k_u \cdot k_j \quad (5.1)$$

O dimensionamento dos transformadores em estudo foi efectuado com base naquele que é o dimensionamento de um transformador dito convencional: uma densidade de corrente (J) de $2 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$, um coeficiente de utilização (k_u) de 0,4 (valor típico) e ainda um coeficiente de relação entre a área da janela e a do ferro (k_j) de 2,84. Este último valor foi obtido através da

divisão da área da janela pela secção do ferro. Conclui-se, assim, que o valor da potência aparente para este núcleo deve ser de 1,64 kVA.

Na caso do dimensionamento ser efectuado para um transformador com ambas as bobinas em material supercondutor, sabe-se que a densidade de corrente iria apresentar-se consideravelmente superior. Tal verificar-se-ia porque a densidade de corrente de um supercondutor é superior à do cobre. Consequentemente, a secção do condutor necessário para o transporte da mesma corrente será menor. Além disso, e por a fita implicar um melhor acondicionamento face ao cobre – devido à sua geometria – é possível que seja ocupado menos espaço da área da janela, podendo reduzir-se o tamanho da travessa e, desta forma, o coeficiente k_j . Também k_u se iria apresentar inferior pois, dada a necessidade de acomodar os crióstatos, apenas uma pequena fracção da área da janela é ocupada pelo condutor.

Para a aplicação deste dimensionamento há a necessidade do transformador apresentar os enrolamentos primário e secundário em fita supercondutora, caso contrário não se pode aplicar a mesma densidade de corrente. Além disso, acresce a dificuldade de obtenção do valor do coeficiente de utilização k_u .

5.5.2 Relações tensão/corrente

As relações tensão/corrente do transformador foram definidas a partir da fita supercondutora disponível em laboratório, sendo definido um valor fixo de 30 espiras para o secundário. Para o primário utilizaram-se 347 espiras de cobre.

A expressão 4.1 foi utilizada para o cálculo da tensão a aplicar por espira,

$$\frac{U_{ef}}{N} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot S_{fe} \cdot f \cdot B_m$$

tendo-se obtido 0,6 V/espira. Desta forma, foi possível obter as tensões nominais do primário e secundário, sendo possível consultar os seus valores na tabela 5.1.

De forma a ensaiar a fita em sobrecarga sem a danificar, utilizou-se uma corrente nominal no secundário de 36 A, representando 40% do valor da corrente crítica dada pelo fabricante desta fita.

Tabela 5.1 - Valores nominais das relações de tensão/corrente

	Primário	Secundário
Tensão nominal (V)	208,2	18,0
Corrente nominal (A)	3,1	36,0

Do dimensionamento previsto de 1,64 kVA, apenas foi possível utilizar uma potência aparente nominal de 648 VA, ficando o núcleo subaproveitado.

6 Procedimento experimental, resultados obtidos e discussão

De seguida apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes dos ensaios realizados para a caracterização da fita, do núcleo e também dos transformadores supercondutor e convencional.

A partir deste capítulo, para simplificar, o transformador com secundário composto por fita supercondutora será referido apenas como transformador supercondutor (TSC).

6.1 Caracterização da fita supercondutora

A tabela 6.1 sumariza as características da fita supercondutora BSCCO-2223 disponível em laboratório. A informação é proveniente do seu fabricante e os valores mencionados são para o regime contínuo.

Tabela 6.1 - Características técnicas da fita Innost Bi-2223

Grandeza	Valor
Corrente crítica	90 A
Densidade crítica de corrente de engenharia	93 A/mm ²
Largura	4,2 ($\pm 0,2$) mm
Espessura	0,23 ($\pm 0,02$) mm
Raio mínimo de curvatura	30 mm (5% de degradação em IC)

De acordo com a informação disponível, não está normalizado nenhum critério para a medição da corrente crítica em regime alternado (AC). Em regime contínuo (DC), pelo contrário, a norma IEC 61788-3 afirma que a corrente crítica ocorre para um campo eléctrico de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ (Lee, J. et al., 2012). Para a análise e aproximação a um valor de corrente crítica em regime AC realizaram-se dois ensaios, um numa fita disposta linearmente e um outro numa bobina do mesmo material. A figura 6.1 representa a montagem experimental para o caso da amostra linear.

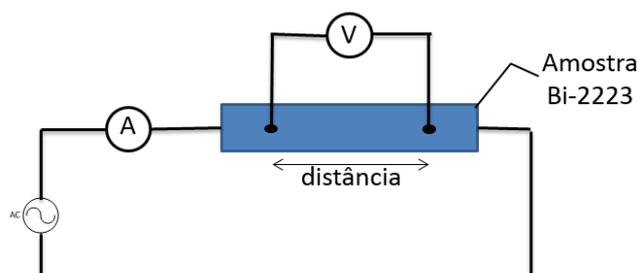


Figura 6.1 - Montagem experimental para a obtenção da corrente crítica em regime AC para a amostra linear

Para a realização dos ensaios, foi lida a tensão entre dois pontos de contacto, enquanto se aplicava ao circuito uma tensão alternada. Os pontos encontravam-se a uma distância de 5 cm no caso da fita e de 729 cm no da bobina. As duas configurações apresentam-se na figura 6.2.



a) Enrolamento



b) Fita

Figura 6.2 - Configurações utilizadas para a realização do ensaio para determinação da corrente crítica.

Os resultados obtidos em ambos os ensaios encontram-se representados nos gráficos das figuras 6.3 e 6.4.

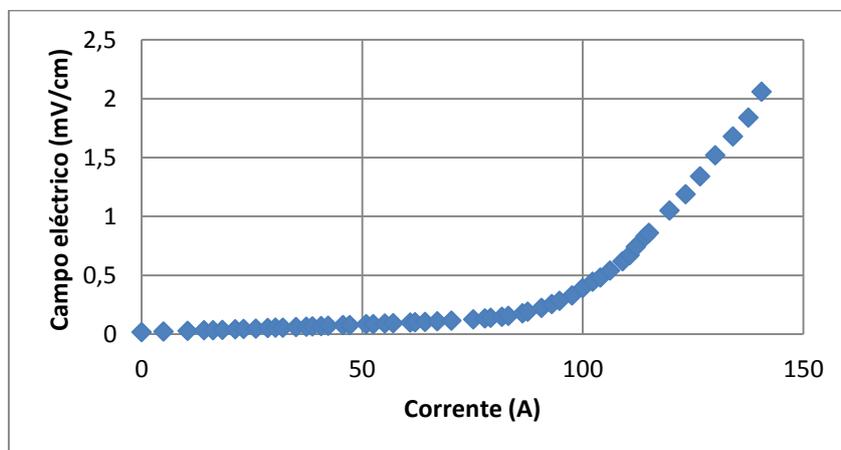


Figura 6.3 - Valores recolhidos no ensaio para a obtenção da corrente crítica em AC no caso da fita supercondutora.

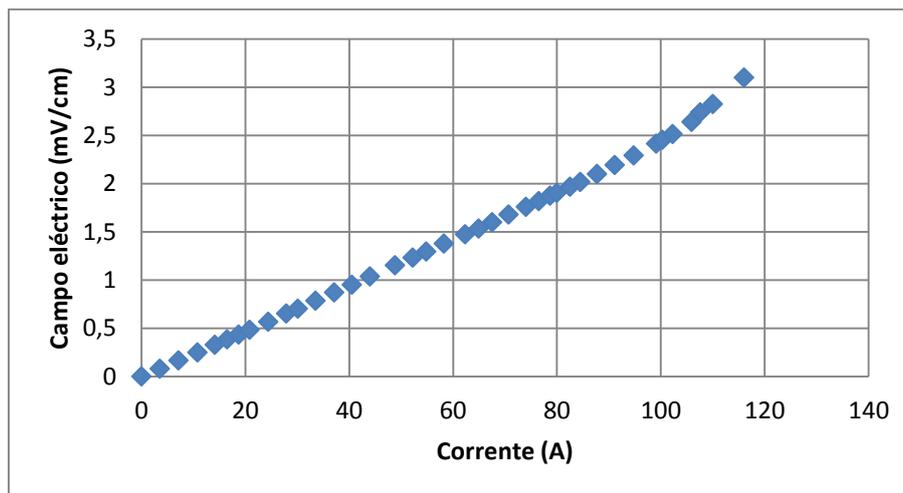


Figura 6.4 - Valores recolhidos no ensaio para a obtenção da corrente crítica em AC no caso da bobina supercondutora.

(Thakur, K, 2011) propõe um método para determinar a corrente crítica em regime AC, que consiste na intercepção de duas rectas. A primeira, tangente à parte da curva que apresenta o menor declive, e a segunda, tangente à parte da curva que apresenta o declive mais acentuado. À primeira também é chamada parte histerética, pois nela predominam as perdas AC. À segunda é chamada de zona resistiva, pois nesta o estado supercondutor desaparece e o material torna-se resistivo. A figura 6.5 mostra uma representação deste método.

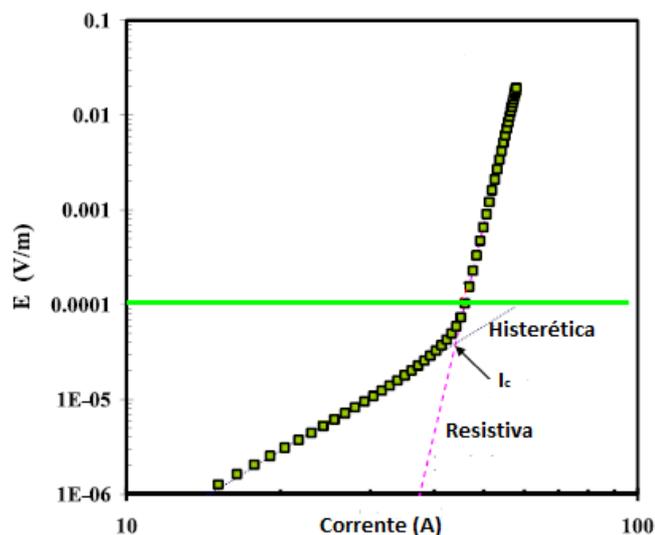


Figura 6.5 - Método para obter a corrente crítica em regime AC para uma fita supercondutora. Adaptado de (Thakur, K, 2011)

Este método foi aplicado para o cálculo da corrente crítica nas duas configurações (fita e bobina), e está representado nos gráficos das figuras 6.6 e 6.7. No caso da fita linear (figura 6.6),

facilmente se observa o início da parte resistiva, o que não se verifica no caso da bobina (figura 6.7), devido à introdução da sua parte indutiva.

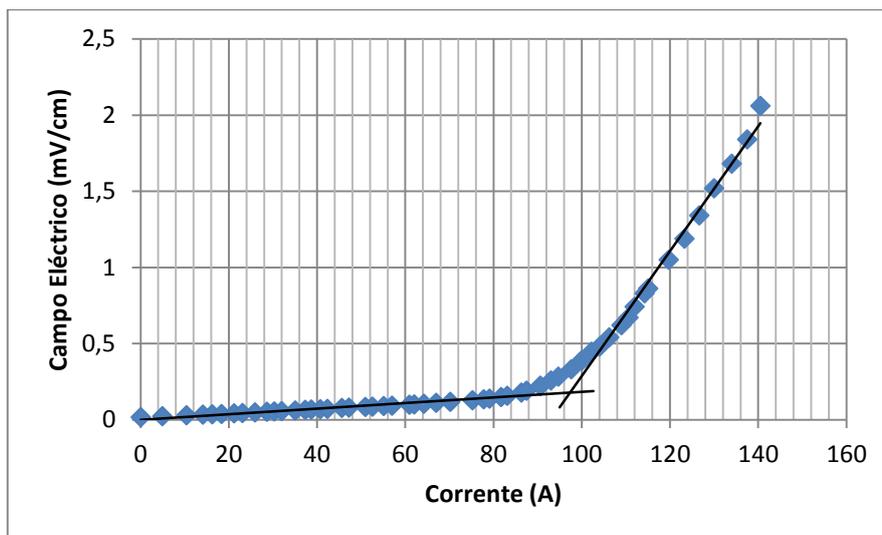


Figura 6.6 - Aproximação à corrente crítica no caso da fita supercondutora.

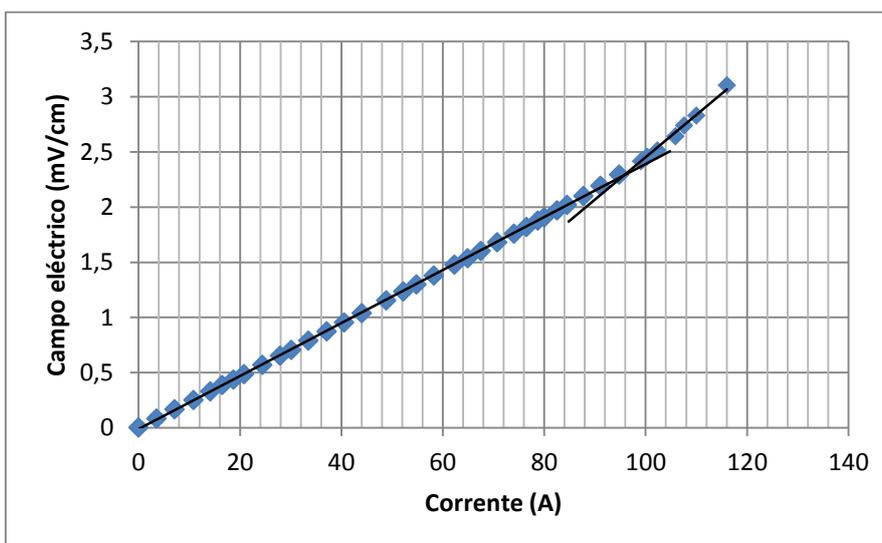


Figura 6.7 – Aproximação à corrente crítica no caso da bobina supercondutora.

Pode então aproximar-se o valor da corrente crítica para o valor de intercepção das duas rectas. Assim, para o caso da fita, a corrente crítica é de 97,3 A, e de 95,7 A para o caso da bobina. A ligeira diferença entre estes dois valores deve-se à dificuldade de percepção do início da zona resistiva. Outra justificação para o valor de corrente crítica (no caso da bobina) ser inferior ao da fita linear prende-se com o facto de neste caso haver densidade de fluxo magnético perpendicular à fita, destruindo a supercondutividade e reduzindo o valor da corrente crítica.

Estes valores apresentam-se ligeiramente superiores aos dados pelo fabricante (90 A em DC), facto previamente fundamentado por (Thakur, K., 2011), mostrando que a corrente crítica aumenta com a frequência, na forma $f^{\frac{1}{n}}$, em que n indica a forma da curva E-J, caracterizando a transição entre estados normal e superconductor. Este valor é obtido pela lei da potência conhecida como $E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^n$, em que E_c representa o campo eléctrico crítico e normalmente é definido segundo o critério $E_c = 1 \mu\text{V/cm}$ e o J_c representa a densidade de corrente crítica.

6.2 Caracterização do núcleo

Para a caracterização do núcleo é necessária a obtenção da curva de primeira magnetização, adquirida através dos valores da corrente de magnetização e do fluxo no ferro, obtidos de forma independente.

6.2.1 Montagem experimental

Como se ilustra na figura 6.8, a montagem inerente a este ensaio requer:

- i) Auto-Transformador regulável (0 V – 400 V): permite aplicar uma tensão variável aos enrolamentos do transformador de isolamento;
- ii) Transformador de Isolamento: responsável pelo isolamento galvânico da montagem experimental relativamente à rede;
- iii) Resistência de Amostragem (R_a) de $0,55 \Omega$: para a medição de modo indirecto da corrente no circuito;
- iv) Núcleo Ferromagnético (o elemento sob ensaio);
- v) Bobinas primária e secundária;
- vi) Integrador: Responsável pela integração da tensão aos seus terminais;
- vii) Placa de aquisição de dados: para a aquisição do valor de tensões aos terminais da resistência e do integrador;
- viii) Computador: utilizado para a leitura da placa de aquisição de dados e seu posterior tratamento.

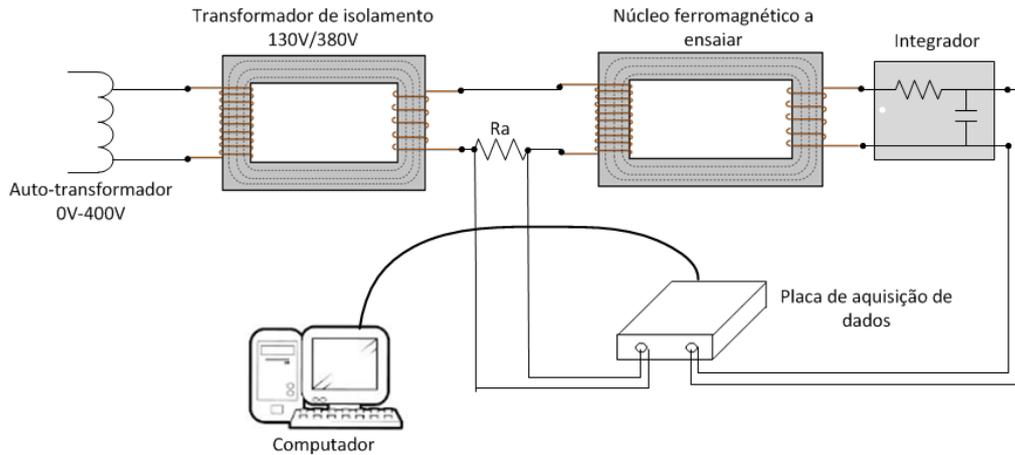


Figura 6.8 – Montagem experimental para obtenção da característica do núcleo.

O núcleo ensaiado é composto por duas bobinas. A primária, na qual se aplica a tensão u_1 , e a secundária deixada em aberto, onde se lê a tensão u_2 , a qual, depois de integrada, é proporcional ao fluxo de indução magnético no núcleo.

A corrente de magnetização (i_1) foi obtida de modo indirecto através da utilização de uma resistência em série de $0,55\Omega$ ligada ao primário do núcleo a ser ensaiado, isto é:

$$i_1 = \frac{u_1}{R_a} \quad (6.1)$$

onde u_1 é a queda de tensão na resistência de amostragem (R_a).

O secundário, por estar em vazio, não é atravessado por corrente, sendo a equação que o descreve é a seguinte:

$$u_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.2)$$

onde u_2 é a queda de tensão no secundário do transformador em ensaio.

Assim, o fluxo no núcleo pode ser obtido a partir da integração da tensão aos terminais da bobina do secundário, ou seja:

$$\Phi = \frac{1}{N_2} \int u_2 dt \quad (6.3)$$

Utilizou-se um integrador do tipo passivo, formado por um circuito RC, com uma constante de tempo de 1 segundo. Este valor, bastante superior ao inverso da frequência utilizada, é condição necessária para que o circuito funcione como integrador. Este apresenta uma impedância significativamente elevada para que a corrente absorvida seja desprezada, e assim a bobina possa ser considerada em vazio. Sendo a equação que descreve o integrador:

$$u_{saida} \approx \frac{1}{\tau} \int u_{entrada} dt \quad (6.4)$$

E tendo em conta que a tensão de entrada no integrador é a tensão no secundário do núcleo, então:

$$\Phi = \frac{\tau}{N_2} u_{saida} \quad (6.5)$$

De forma análoga, é possível representar a característica do núcleo em termos de densidade de fluxo magnético (B) e campo magnético (H). Para tal, é necessário recorrer à lei de Ampère, que estabelece que a corrente no enrolamento é proporcional ao integral fechado de circulação de H.

$$\oint_l \mathbf{H} dl = Ni \quad (6.6)$$

Por outro lado como o fluxo ligado é proporcional ao integral de superfície do campo B através da secção do núcleo:

$$\Psi = N \iint_{S_{fe}} (\mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}}) dS \quad (6.7)$$

Assim, se se considerar que no núcleo o campo de indução magnética e o campo magnético são uniformes, obtêm-se as expressões:

$$H = \frac{N_1 i_1}{l_{med}} \quad B = \frac{\Psi}{N_1 S_{fe}}$$

Em que l_{med} representa o perímetro da linha média do núcleo, e S_{fe} a área da sua secção recta.

De forma a obter da característica do ferro, três ensaios foram realizados:

- 1) Enrolamento primário (70 espiras) e secundário (65 espiras), ambos em cobre, sobrepostos na mesma coluna, com o secundário sobreposto ao primário.
- 2) Enrolamento primário (70 espiras) e secundário (30 espiras), ambos em cobre, colocados em colunas diferentes. O secundário é o mesmo que o utilizado no protótipo do transformador.
- 3) Enrolamento primário (70 espiras) e secundário (30 espiras), em que o primeiro é composto por cobre e o segundo (mesmo que o utilizado no protótipo do transformador) por material SAT colocado dentro de um crióstato para arrefecimento; ambos colocados em colunas diferentes.

6.2.2 Resultados obtidos

As figuras 6.9 e 6.10 apresentam os resultados obtidos para os ensaios 1, 2 e 3 descritos na secção 6.2.1.

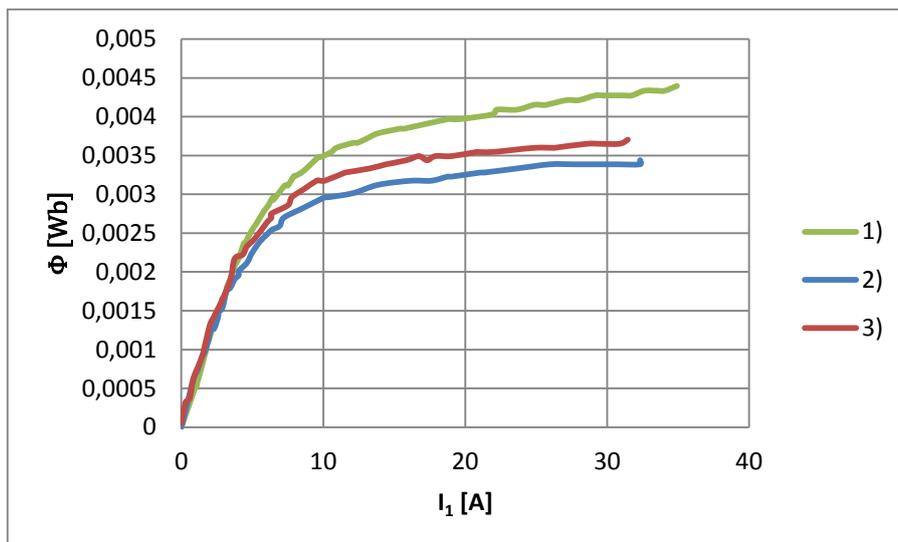


Figura 6.9 – Evolução do fluxo simples em função da corrente no primário

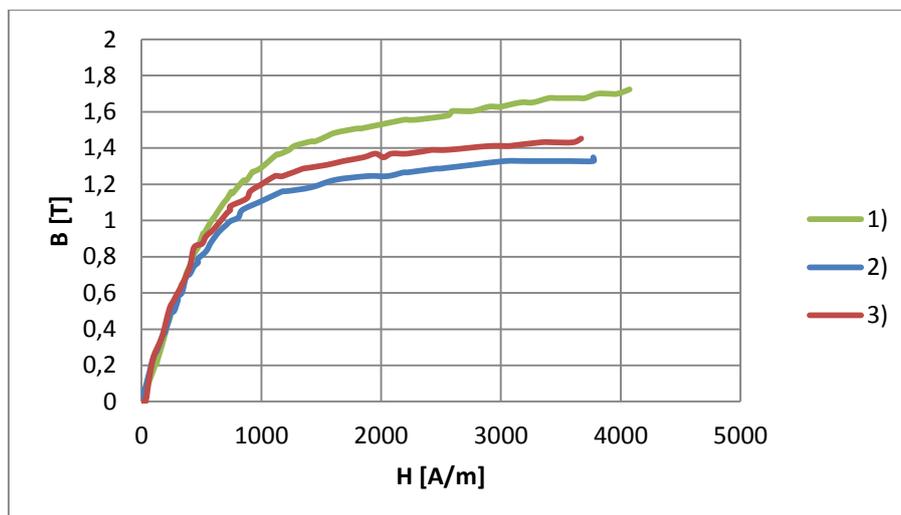


Figura 6.10 - Curva de primeira magnetização para o núcleo ferromagnético

Analisando os resultados obtidos, é possível verificar uma diferença significativa entre as curvas de primeira magnetização para os vários ensaios. Na situação dos enrolamentos sobrepostos, a curva respectiva é a que apresenta uma maior densidade de fluxo magnético de saturação, visto que o secundário abraça todo o fluxo produzido pelo primário e, conseqüentemente, também a dispersão a ele associada.

Comparando as características dos transformadores com as bobinas em colunas diferentes, facilmente se averigua que existe um melhor comportamento no caso do transformador com enrolamento em fita supercondutora, isto é, apresenta este também uma maior densidade de fluxo magnético de saturação.

Tendo em conta que os transformadores utilizados nos ensaios são compostos por enrolamentos em colunas diferentes, destacar-se-ão os resultados respectivos aos dois ensaios com estas características.

Assim, através da análise da curva de primeira magnetização, é possível aferir que esta é praticamente linear até um valor de densidade de fluxo magnético (B) de 1 T. Isto está de acordo com o valor escolhido no dimensionamento dos transformadores. Na figura 6.11 encontram-se os ciclos de histerese para o valor de B mais próximo do escolhido. Em ambos os casos, as perdas totais no núcleo foram de 13,9 W, valor calculado a partir da expressão 3.7.

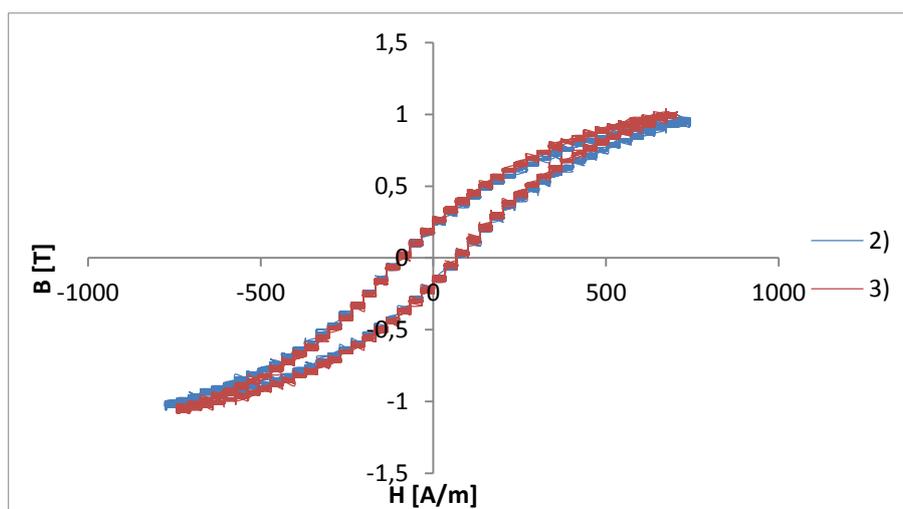


Figura 6.11 – Ciclos de histerese para o valor de densidade de fluxo magnético de 1T.

Para que a análise seja mais completa, efectuaram-se dois estudos complementares: um determinando o comportamento da permeabilidade magnética relativa e outro sobre as perdas associadas ao núcleo (figuras 6.12 e 6.13).

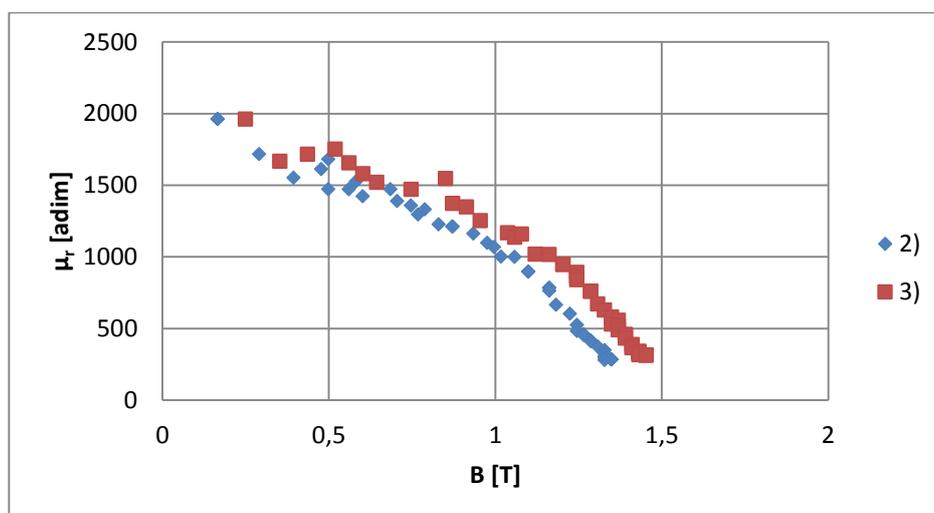


Figura 6.12 – Evolução da permeabilidade magnética relativa em função da densidade de fluxo magnético

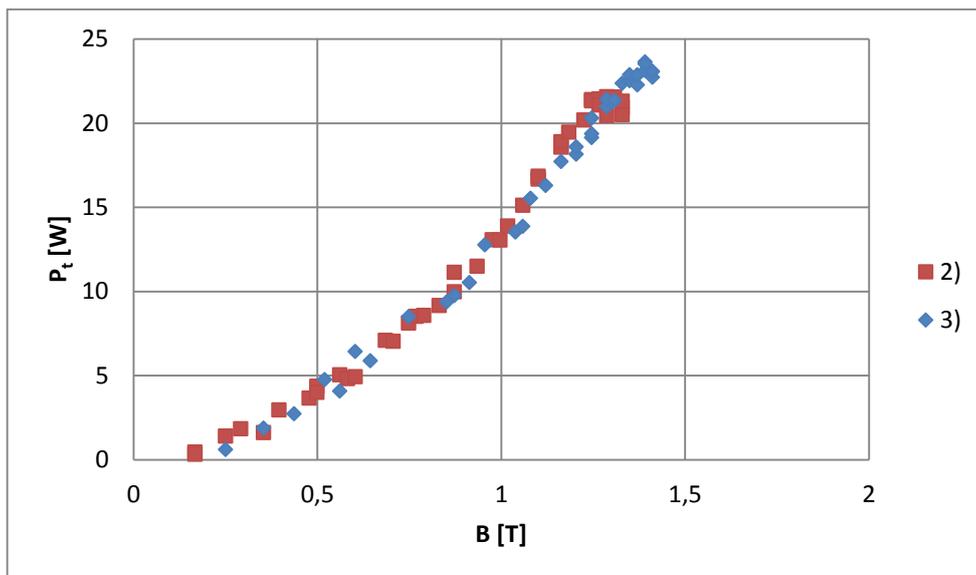


Figura 6.13 - Perdas magnéticas totais em função da densidade de fluxo magnético

Da análise dos dados do primeiro ensaio (figura 6.12), observa-se uma maior permeabilidade no caso do transformador com fita supercondutora para diferentes valores de densidade de fluxo magnético. Tais resultados justificam-se pela diminuição da temperatura na coluna do crióstato e são suportados por (Miyagi, D., 2010). Segundo (Pronto, A., 2010), a diminuição da temperatura provoca a redução da agitação térmica da rede, o que por um lado contribui para a diminuição da resistividade eléctrica, mas por outro contribui para o aumento da permeabilidade magnética.

No que diz respeito ao segundo ensaio (figura 6.13), o comportamento relativo às perdas associadas ao núcleo aparenta ser semelhante para ambos os casos, apesar da oscilação verificada nos resultados.

6.3 Obtenção dos parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz

Para caracterizar e comparar os transformadores, foram realizados ensaios em vazio e em curto-circuito, por forma a determinar os parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz. Os resultados encontram-se nas tabelas 6.2 e 6.3

Tabela 6.2 - Resultados do ensaio em vazio

Vazio	P_{10} [W]	U_{10ef} [V]	I_{10ef} [A]	U_{2ef} [V]
TC	19,5	208,2	0,85	15,14
TSC	19	208,2	0,79	16,39

Tabela 6.3 - Resultados do ensaio em curto-circuito

Curto-circuito	P_1 [W]	U_{1ef} [V]	I_{1ef} [A]	I_{2ef} [A]
TC	85	128	3,20	36
TSC	87	133,4	3,35	36

Da análise aos resultados apresentados nas tabelas acima, conclui-se que a corrente de magnetização (I_{10ef}) tem um valor consideravelmente elevado, comparativamente à corrente nominal I_{1n} , isto é, cerca de $\frac{1}{4}$ da corrente nominal do primário; a tensão de curto-circuito (U_{1ef}) é um pouco mais de metade da tensão nominal (U_{1n}). Estes valores fazem com que não se deva desprezar o ramo transversal no ensaio em curto-circuito, nem a impedância do primário no ensaio em vazio. Com estes valores é ainda possível obter a tensão de curto-circuito à corrente nominal (η_{cc}), 61,5% para o TC e 64,1% no caso do TSC.

Para a obtenção dos parâmetros do transformador, houve a necessidade de realizar um ensaio extra para a obtenção dos valores do ramo transversal (sem aproximações). A respectiva montagem foi feita de acordo com o esquema indicado na figura 6.14.

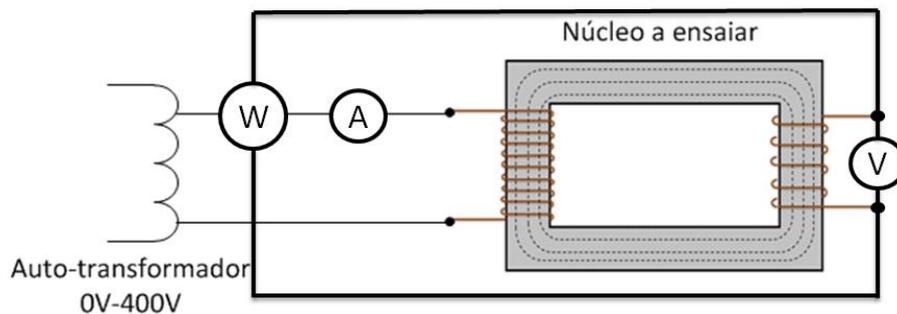


Figura 6.14 - Montagem do ensaio para obtenção dos valores do ramo transversal do esquema equivalente de Steinmetz

Como o secundário está em vazio, a tensão presente será a mesma que no ramo transversal, tal como a corrente a circular no primário (figura 6.15). A potência lida (P') é de valor fictício, servindo para calcular a defasagem entre a corrente do primário (I_{1ef}) e a tensão do secundário (U_{2ef}).

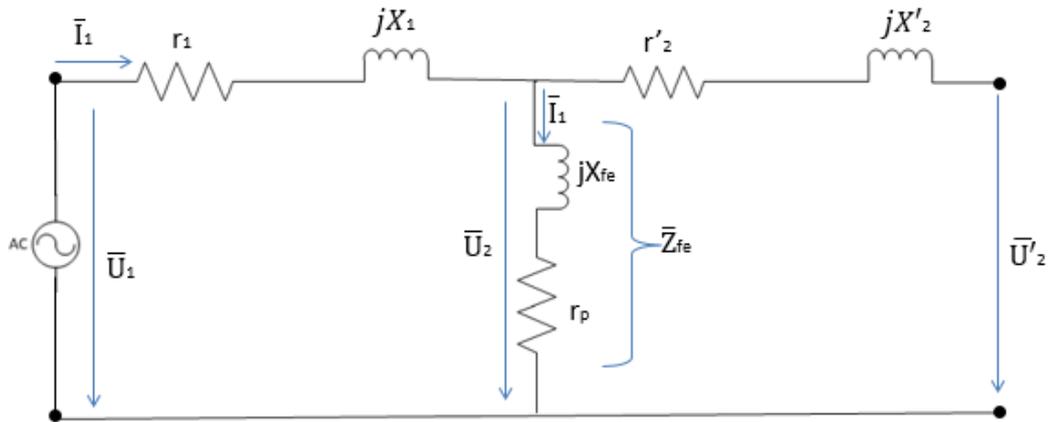


Figura 6.15 - Esquema equivalente de Steinmetz simplificado para a obtenção dos valores do ramo transversal.

A tabela 6.4 apresenta os valores respectivos a este ensaio.

Tabela 6.4 - Resultados do ensaio para obtenção do ramo transversal

	P' [W]	U_{2ef} [V]	I_{1ef} [A]
TC	2,12	18	0,97
TSC	2,02	18	0,89

Com os dados recolhidos, e através das expressões seguidamente indicadas, é possível obter o valor dos parâmetros do ramo transversal.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P'}{U_{2ef} \cdot I_{1ef}} \quad (6.8)$$

$$\bar{Z}_{eq} = \frac{U'_{2ef}}{I_{1ef}} \angle \theta = \frac{U_{2ef} \cdot m}{I_{1ef}} \angle \theta \quad (6.9)$$

As tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 resumem todos os parâmetros obtidos:

Tabela 6.5 - Parâmetros do ensaio em vazio

Ensaio vazio				
	Z_0 [Ω]	θ [°]	R_0 [Ω]	X_0 [Ω]
TC	244,94	83,67	26,99	243,45
TSC	263,54	83,37	30,44	261,78

Tabela 6.6 - Parâmetros do ensaio em curto-circuito

Ensaio Curto-circuito				
	Z_{cc} [Ω]	θ [$^\circ$]	R_{cc} [Ω]	X_{cc} [Ω]
TC	40,00	78,02	8,30	39,13
TSC	39,82	78,77	7,75	39,06

Tabela 6.7 - Parâmetros do ensaio para a obtenção do ramo transversal

Ensaio ramo transversal				
	Z'_0 [Ω]	θ [$^\circ$]	R'_0 [Ω]	X'_0 [Ω]
TC	214,65	83,03	26,06	213,06
TSC	233,94	82,76	29,50	232,07

A partir dos valores calculados, foi possível completar o equivalente de Steinmetz (figuras 6.16 e 6.17) através das fórmulas respectivas.

$$R_p = R'_0 \quad X_{fe} = X'_0$$

$$R_1 = R_0 - R'_0 \quad X_1 = X_0 - X'_0$$

$$X_{cc} = X_1 + \frac{X_{fe} \cdot X'_2}{X_{fe} + X'_2}$$

$$R_{cc} = R_1 + \frac{R_p \cdot R'_2}{R_p + R'_2}$$

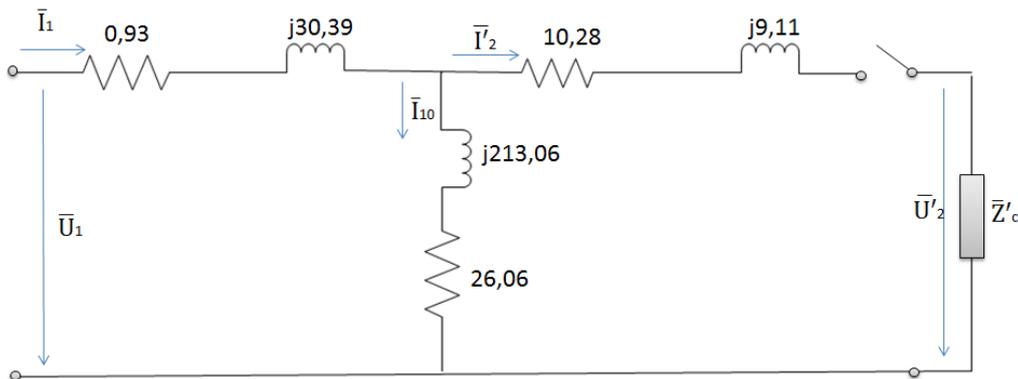


Figura 6.16 – Esquema equivalente de Steinmetz com os parâmetros do transformador convencional.

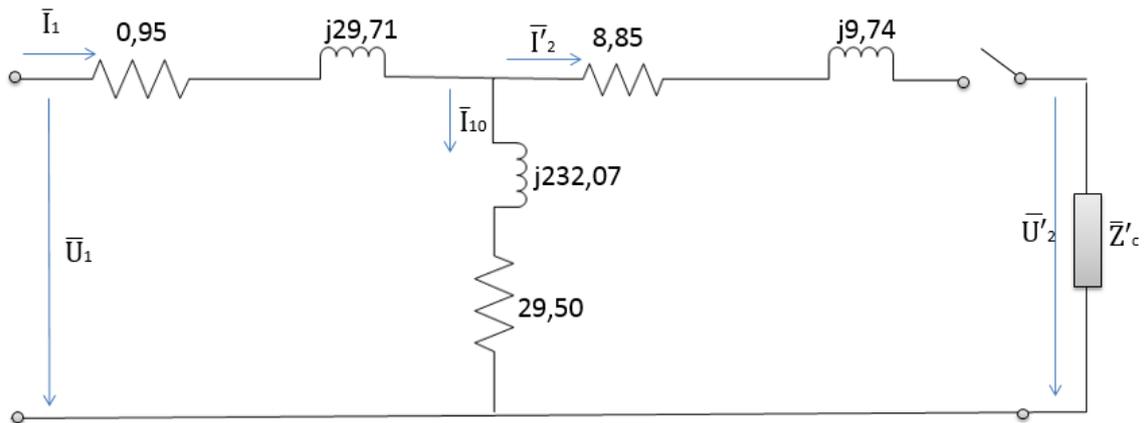


Figura 6.17 – Esquema equivalente de Steinmetz com os parâmetros do transformador supercondutor.

Os resultados apresentados estão de acordo com o esperado. Começando pelo primário – comum aos dois ensaios – constata-se que a resistência e o coeficiente de dispersão não apresentam uma diferença significativa (variação de 2%).

Quanto ao secundário, e no caso do transformador supercondutor, a fita exibe um decréscimo de 14% na resistência. Era expectável verificar-se um decréscimo – por saber-se que a resistência na fita supercondutora é muito inferior à do cobre – apesar de mais significativo do que os 14%. Parte da resistência verificada deve-se principalmente aos contactos resistivos à saída da bobina e ao condutor eléctrico utilizado (cobre) para fazer o curto-circuito. Já a dispersão aumenta em 7% devido ao afastamento da bobina da coluna criada pela presença do crióstato. Para obter ambos os valores reais - resistência e indução de dispersão – torna-se necessário proceder à conversão, dividindo pelo quadrado da razão de transformação ($m = 11,567$).

É na análise ao ramo transversal que se observam as maiores diferenças. O coeficiente de auto-indução principal e a resistência de perdas no ferro (para o caso da fita SAT) aumentam em 9% e 13%, respectivamente.

O aumento do primeiro vai ao encontro do fundamentado na secção 6.2, apresentando o núcleo uma maior permeabilidade quando arrefecido. A justificação do aumento da resistência relaciona-se com o arrefecimento do núcleo (Miyagi, D., 2010). A baixa temperatura a agitação térmica da rede diminui o que contribui para a diminuição da resistividade eléctrica, aumentando assim as perdas por correntes de Foucault (Pronto, A., 2010). Outra justificação possível é a evaporação do azoto e posterior condensação de água na zona de contacto entre a travessa e as colunas: como a zona não tem isolamento, provoca um curto-circuito, aumentando as perdas por correntes de Foucault e, conseqüentemente, as perdas associadas ao núcleo. Na figura 6.18 pode ver-se a zona de contacto entre a travessa e as colunas molhada.

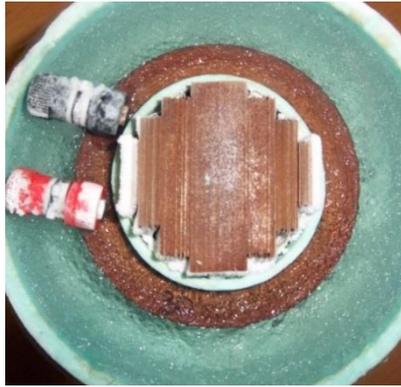


Figura 6.18 - Zona de contacto entre a travessa e as colunas molhada (caminho do fluxo magnético).

6.4 Ensaios do transformador em carga

Para estudar o transformador para diferentes valores de carga, foram combinadas três resistências, duas de 1 Ω , e uma de 2,7 Ω . Com este método, avaliou-se o desempenho do transformador em sobrecarga, plena carga e folgado. Os resultados apresentam-se nas tabelas 6.8 e 6.9.

Tabela 6.8 - Resultados obtidos dos ensaios em carga para transformador convencional

R_{eq} [Ω]	P_1 [W]	U_1 [V]	I_1 [A]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\frac{I_2}{I_{2n}} \cdot 100$ [%]
0,456923	950	318,0	4,60	18	39,3	109,2
0,55	790	304,0	3,82	18	32,7	90,8
1,1	393	271,3	2,14	18	16,3	45,3
2,2	202	257,3	1,46	18	8,1	22,5

Tabela 6.9 - Resultados obtidos dos ensaios em carga para transformador supercondutor

R_{eq} [Ω]	P_1 [W]	U_1 [V]	I_1 [A]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\frac{I_2}{I_{2n}} \cdot 100$ [%]
0,456923	955	308,0	4,57	18	39,3	109,2
0,55	795	294,1	3,80	18	32,7	90,8
1,1	395	256,3	2,08	18	16,3	45,3
2,2	202	241,0	1,32	18	8,1	22,5

As figuras seguintes complementam a análise. Os gráficos serão apresentadas em função da percentagem de corrente presente no secundário face à nominal ($\frac{I_2}{I_{2n}} \cdot 100\%$), isto é, corrente estipulada ou por unidade, em que 100% representa a corrente nominal (36 A). O transformador encontra-se em sobrecarga para valores superiores a 100% e folgado para valores inferiores.

Na figura 6.19 pode observar-se a pouca variação da potência activa absorvida da rede pelo transformador supercondutor face ao convencional para diferentes valores de carga.

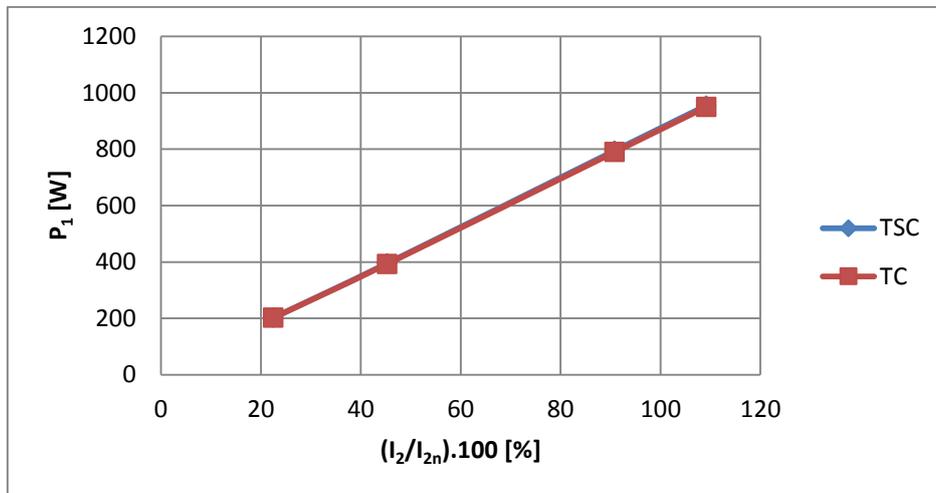


Figura 6.19 – Potência activa absorvida à rede para diferentes valores de carga

O transformador supercondutor necessita de menos corrente e tensão no primário para obter no secundário as condições nominais. Esta diferença é mais notória para baixos valores de carga (figuras 6.20 e 6.21).

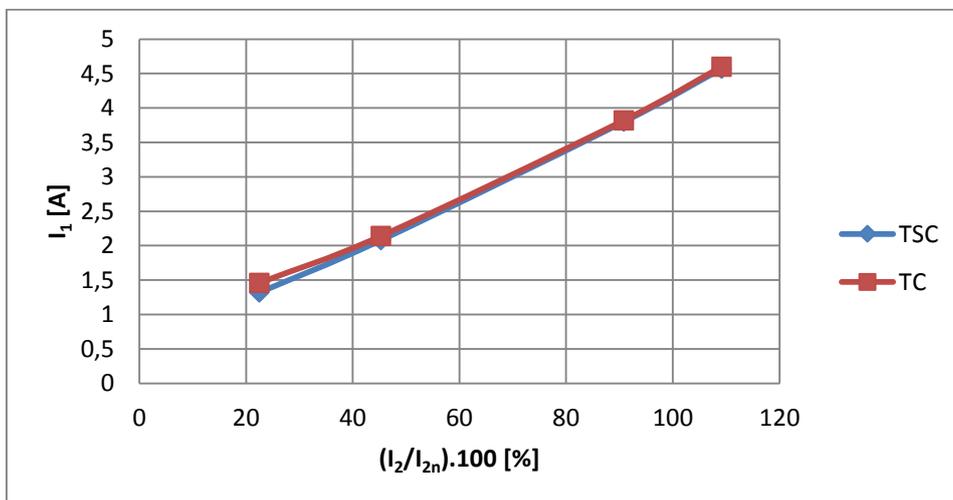


Figura 6.20 – Corrente no primário dos transformadores para diferentes valores de carga.

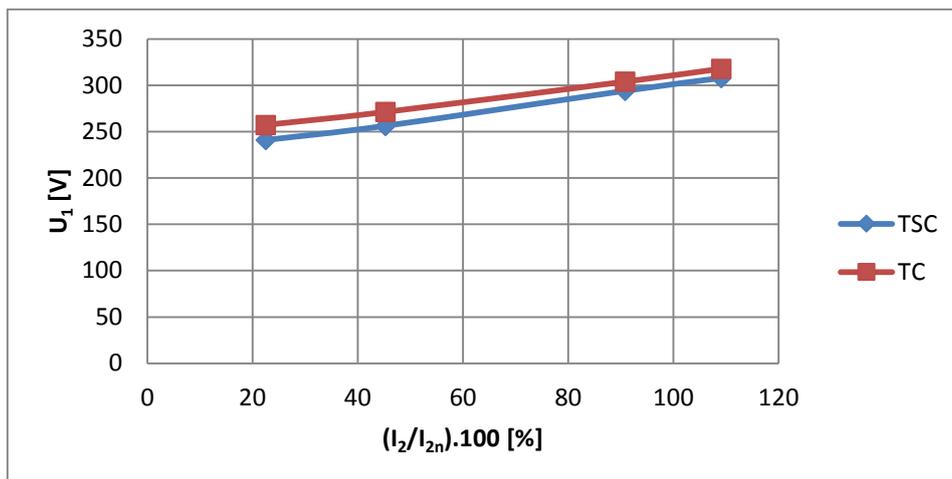


Figura 6.21 – Tensão no primário dos transformadores para diferentes valores de carga.

Da análise ao gráfico 6.21, é possível aferir que quando o transformador está folgado, mais precisamente para uma carga de 22,5%, o TC necessita de uma tensão no primário de 6,76% a mais que o TSC. Quando o transformador está a trabalhar perto da plena carga, mais precisamente a 90,8%, o TC necessita de uma tensão no primário de 3,37% a mais que o TSC. Finalmente, na situação de sobrecarga (109,2%), 3,25% é o valor a mais de tensão que o TC tem em relação ao TSC.

É então possível concluir que a potência aparente solicitada ao primário é inferior para o caso do transformador supercondutor, como ilustra o gráfico da figura 6.22.

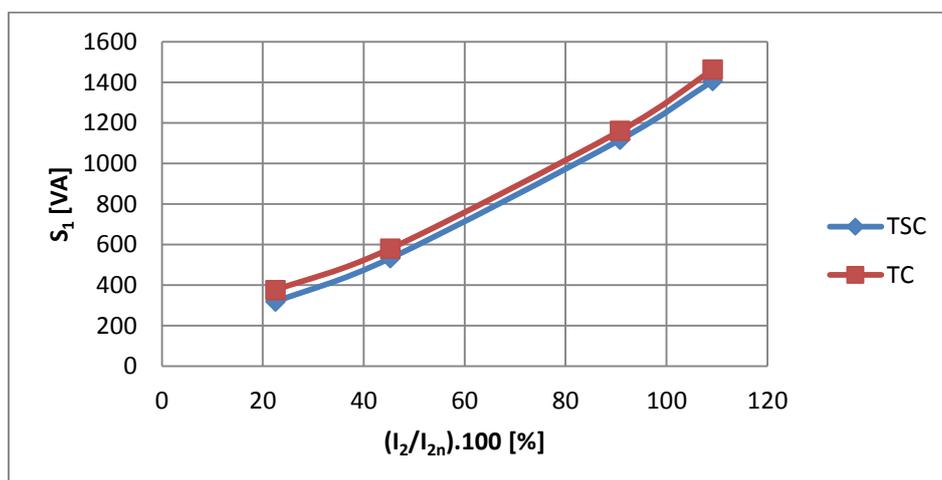


Figura 6.22 - Potência aparente no primário dos transformadores para diferentes valores de carga

Quanto ao rendimento, verifica-se que é ligeiramente inferior no transformador supercondutor apenas para maiores valores de carga, como ilustram os gráficos das figuras 6.23 e 6.24.

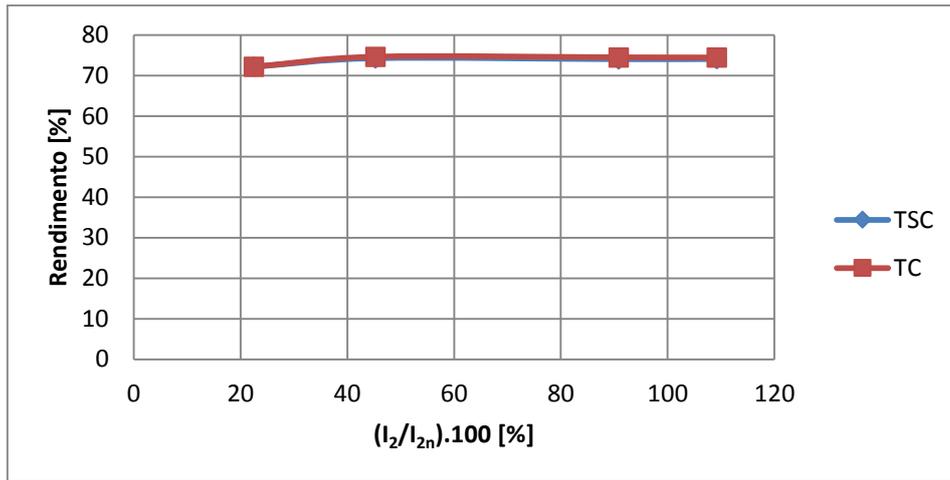


Figura 6.23 – Rendimento dos transformadores para diferentes valores de carga

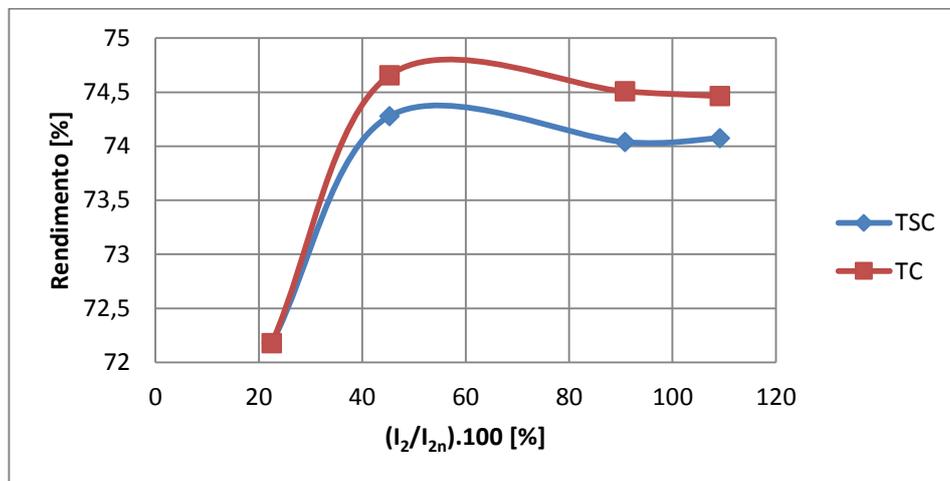


Figura 6.24 – Rendimento dos transformadores para diferentes valores de carga (ampliado)

A regulação de tensão é a quantidade de tensão eficaz que é necessário fornecer ao primário, além da nominal para obter no secundário a tensão nominal. Este valor é apresentado em percentagem.

$$RT = \frac{U_{1c} - U'_2}{U'_2} \cdot 100\% \quad (6.10)$$

Na figura 6.25 pode ver-se o acréscimo da tensão do primário, não só para o valor de carga nominal, mas também para diferentes valores de carga.

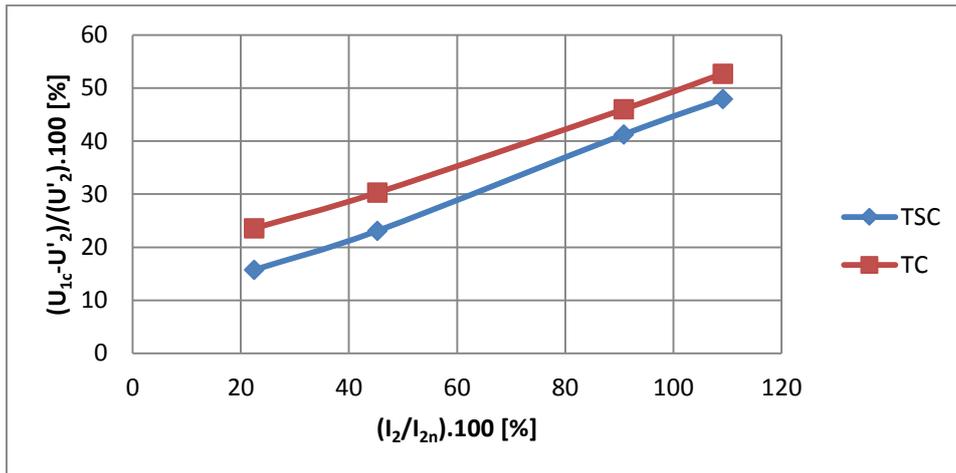


Figura 6.25 - Variação de tensão no primário dos transformadores para diferentes valores de carga

Desta forma, a regulação de tensão para a carga nominal de $0,5 \Omega$ ronda os 50% no caso do transformador convencional e os 45% no caso do supercondutor, apresentando este último uma melhor RT.

Para concluir, uma análise genérica aos transformadores em carga. Começando pelas perdas, estas não apresentam diferenças significativas, resultado facilmente confirmado pela variação máxima de rendimento de 0,47% verificada em altos valores de carga. Apesar de a resistência do secundário do TSC ser inferior, o seu núcleo apresenta uma resistência de perdas magnéticas superior, acabando por compensar as perdas.

Por outro lado, verifica-se que a ligação magnética melhora para o caso do TSC, como previsto nos capítulos anteriores, facilmente verificado pela menor potência aparente exigida no primário para obtenção do valor de tensão nominal no secundário, fazendo com que o TSC apresente uma melhor regulação de tensão do que o convencional.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

Os protótipos dos transformadores de potência desenvolvidos – Transformador convencional e Transformador com Supercondutor - permitiram atingir os objectivos inicialmente previstos. As conclusões alcançadas são importantes e poderão ser úteis para desenvolvimentos futuros neste âmbito.

Todos os ensaios foram projectados numa perspectiva de comparação entre os dois protótipos, de forma a concluir sobre o potencial da utilização de material supercondutor no transformador comparativamente ao cobre, material convencionalmente utilizado. A tabela 7.1 resume as características e resultados obtidos nos ensaios e permite a comparação entre o transformador convencional e o transformador com o secundário em bobina supercondutora.

Tabela 7.1 – Resumo das características e resultados obtidos nos ensaios do transformador convencional e do transformador com secundário em material supercondutor

	TC	TSC
Potência [VA]	648	648
U_{1n}/U_{2n} [V]	208,2/18,0	208,2/18,0
I_{1n}/I_{2n} [A]	3,1/36,0	3,1/36,0
Temperatura	Ambiente	Crióstato no secundário com azoto líquido a 77K
Material	Enrolamentos em Cobre	Primário cobre; Secundário fita Bi-2223
Tipo	Monofásico	Monofásico
η_{cc} [%]	61,5	64,1
η [%]	74,7	74,3
RT [%]	50	45
R_1 [Ω]	0,93	0,95
X_1 [Ω]	30,39	29,71
R_2 [Ω]	0,077	0,066
X_2 [Ω]	0,068	0,073
R_p [Ω]	26,06	29,50
X_{fe} [Ω]	213,06	232,07

A utilização de fita supercondutora no secundário do transformador provoca uma diminuição da resistência. Esta diminuição era esperada apesar de ter sido menos significativa do que o espectável. Parte da resistência verificada deve-se aos contactos eléctricos utilizados para unir a fita SAT ao cobre. Por outro lado, esta diminuição demonstra que as perdas AC presentes na fita supercondutora não são insignificantes quando comparadas com as perdas por efeito de Joule nos condutores eléctricos convencionais.

A utilização de fita supercondutora implica também o arrefecimento do núcleo devido à necessidade de arrefecer a fita para temperaturas criogénicas, o que aumenta a sua resistência e reactância. O aumento da resistência deve-se também à água retida na zona de contacto entre a travessa e a coluna do secundário, provocando um curto-circuito entre chapas. Uma solução possível para contornar esta situação seria a construção de um mecanismo que permitisse ao azoto circular por um caminho fechado.

Apesar da diminuição das perdas por efeito de Joule no secundário, as perdas totais do núcleo apresentaram-se superiores, o que condiciona a conclusão relativa às perdas totais dos transformadores. Contudo, é de notar que os condutores eléctricos utilizados no circuito de ensaios não têm resistência desprezável, pelo que parte das perdas resulta da resistência desses condutores e respectivos contactos.

Uma forma de minimizar a sua resistência passaria pela optimização do circuito, nomeadamente pela redução do comprimento dos condutores e aumento da sua secção. Aumentar a potência do transformador e a tensão do secundário seria uma opção alternativa para minimizar a influência das perdas dos contactos e dos condutores eléctricos.

Para considerações futuras, e dados os resultados do presente trabalho, seria relevante que ambos os enrolamentos fossem compostos por fita supercondutora de forma a melhor avaliar o verdadeiro impacto deste material nos transformadores de potência. Interessante seria também fazer o dimensionamento para um transformador com primário e secundário compostos por fita supercondutora como proposto na secção 5.5.1. Ter-se-ia em conta a possível redução da travessa e o projecto exacto dos crióstatos a utilizar de forma a uma avaliação precisa dos coeficientes de utilização (k_u) e da relação entre a área da janela e a do ferro (k_j).

Seria ainda relevante fazer uma validação de um critério para a medição da corrente crítica em regime alternado, tal como já existe para o regime contínuo.

Referências Bibliográficas

- Ariante, M., Formisano, A., Marignetti, F., et al. (2006). New perspectives in HTS transformer design. *Institute of Physics, Conference series 43*, 845-848.
- Baldwin, T., Ykema, J., Allen, C., et al. (2003, Junho). Design Optimization of High Temperature Superconducting Power Transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13, 2, pp. 2344-2347
- Bohno, T., Tomioka, A., Imaizumi, M., et al. (2005, Outubro). Development of 66 kV/6.9 kV 2 MV A prototype HTS power transformer. *Physica C: Superconductivity*, 426-431, Part 2, pp. 1402-1407.
- Burns, G. (1992). *High Temperature Superconductivity: An Introduction*. Academic Press.
- Ceballos, J. (2010) *Analysis of ac losses in superconducting electrical components for application in the design of electrical systems*. Tese de Doutorado, Universidad de Extremadura.
- Chen, X., Jin, J. (Junho, 2008) Development of HTS Transformers and a 10 kVA HTS Transformer Prototype Design. *Journal of electronic science and technology of china*, 6, 2, pp 130-136
- DeCristofaro, N. (1998). Amorphous metals in electrical-power distribution applications. *Materials Research Society Bulletin*, 23, pp. 50-56.
- Fitzgerald, A., Kingsley, C., Umans, S., (2003) *Electric Machinery*, 6th ed. –New York: McGraw-Hill
- Fleshler, S., Buczek, S., Carter, B. (2009, Outubro) Scale-up of 2G wire manufacturing at American Superconductor Corporation, 15-20, 469, Pp 1316-1321, *Physica C: Superconductivity*
- Funaki, K., Iwakuma, M., Takeo, M. et al. (1997, Junho). Preliminary Tests of A 500 kVA-Class Oxide Superconducting Transformer Cooled by Subcooled Nitrogen. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7, 2, pp. 824-827
- Iwakuma, M., Funaki, K., Kajikawa, K., et al. (2001, Março). AC loss properties of a 1 MVA single-phase HTS power transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11, Part 2, pp 1482-1485
- Kamijo, H., Hata, H., Fujimoto, H., et al. (2006). Fabrication of Superconducting Traction Transformer for Railway Rolling Stock. *Journal of Physics: Conference Series*, 43, 1, pp. 841-844.
- Karsai, K., Kerényi, D., & Kiss, L. (1987). *Large Power Transformers*. Elsevier.
- Khosravi, D., Saniei M. (2011, Setembro) Design and numerical magnetic fields analysis of 10 kVA, 220/24 V, HTS transformer. *International Universities' Power Engineering Conference*.
- Kim, S.-H., Kim, W.-S., Choi, K.-D., et al. (2005, Junho). Characteristic Tests of a 1 MVA Single Phase HTS Transformer With Concentricallly Arranged Windings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15, 2, pp. 2214-2217.
- Kimura, H., Honda, K., Hayashi, H., et al. (2002, Agosto). Test results of a HTS power transformer connected to a power grid. *Physica C: Superconductivity*, 372- 376, Part 3, pp. 1694-1697.

- Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2004). *Transformer Engineering: Design and Practice*. CRC Press.
- Lapthorn, A., Chew, I., Enright, W. et al. (2011, Janeiro). HTS Transformer: Construction Details, Test Results, and Noted Failure Mechanisms. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26, 1, pp. 394-399
- Lee, H. J., Cha, G., Lee, J.-K., (2001, Março). Test and Characteristic Analysis of an HTS Power Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11, 1, pp. 1486-1489.
- Lee, J., Choi, K., Kim, W. et al. (1999, Junho). Development of a Three Phase 100 kVA Superconducting Power Transformer with Amorphous Cores. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9, 2, pp. 1293-1296.
- Lee, J., Choi, S., Hwang, Y., et al, (2012, Junho) Transition Criteria for Critical Current Measurement of High Temperature Superconductor in AC Circumstance. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22, 3.
- Lee, S., Lee, H. J., Cha, G., et al. (2002, Março). Test Results of a Three Phase HTS Transformer with Double Pan Cake Windings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 12, 1, pp. 808-811.
- Leghissa, M., Gromoll, B., Rieger, J., et al. Development and application of superconducting transformers. *Physica C*, 372–376, pp 1688–1693
- Lim, H., Cha, G., Lee, K., et al. (2007, Junho). AC Losses of Pancake Winding and Solenoidal Winding Made of YBCO Wire for Superconducting Transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17, 2, pp 1951-1954
- Long, N. J., Badcock, R., Beck, P., et al. (2008, Fevereiro). Narrow strand YBCO Roebel cable for lowered AC loss. *Journal of Physics: Conference Series*, 97, 1, p. 012280.
- Martignoni, A. (1991). *Transformadores*. 8th ed – Sao paulo: Globo
- McConnell, B. W., Metha, S. P., & Walker, M. S. (2000, June). HTS Transformers. *IEEE Power Engineering Review*, 20, 6, pp. 7-11.
- McLyman, C. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. 3rd ed., revised and expanded. - New York : Marcel Dekker
- Mehta, S. P., Aversa, N., & Walker, M. S. (1997, July). Transforming transformers. *IEEE Spectrum*, 34, 7, pp. 43-49.
- Miyagi, D., Otome, D., Nakano, M., et al. (2010, Fevereiro). Measurement of Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel Sheet at Liquid Nitrogen Temperature Using Single Sheet Tester. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 46, 2, pp 314-317
- Oomen, M., Rieger, J., Hussennether, V. et al. (2004, Abril). AC loss in high temperature superconducting conductors, cables and windings for power devices. *superconductor science and technology*, 17, pp 394-399.
- Pina, J. M. (2010). *Desenho, Modelização e Controlo de Dispositivos de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Eng^a Electrotécnica, Caparica.
- Polák, M., Pitel, P., Piel, H., et al. (2001, Março). Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11, 1, pp 1478-1481

Pronto, A. (2011). *Análise de Perdas em Sistemas de Energia que Empregam Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Eng^a Electrotécnica, Caparica.

Santos, D., Rochelle, L., et al. (Novembro, 2002). PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FITAS SUPERCONDUTORAS Ag/BSCCO. Congresso Brasileiro de engenharia e ciências dos materiais, pp 417-422

Schlabbach, J. (2008). *Short-circuit Currents*. London, UK: The Institution of Engineering and Technology.

Schwenterly, S. W., McConnell, B. W., Demko, J. A., et al. (1999, Junho). Performance of a 1-MVA HTS Demonstration Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9, 2, pp. 680-684.

Staines, M., Glasson, N., Pannu, M. et al. (2011, Agosto). The development of a Roebel cable based 1 MVA HTS transformer. *SUPERCONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 25, 7pp.

Thakur, K., Raj, A., Brandt, E., et al. (2011, Abril) Frequency-dependent critical current and transport ac loss of superconductor strip and Roebel cable. *Superconductor science and technology*, 24, 11pp

Vecchio, R., Poulin, B., Feghali, P., Shah, D., Ahuja, R. (2010) *Transformer Design Principles*, 2nd ed. – New York : CRC Press

Vieira, G. A., Pinto, M. F., Teixeira, J. M., Fraga, B. L., Silveira, F. S., & Oliveira, R. W. (2000). *Materiais amorfos*. Universidade Federal de Minas Gerais.

Wang, Y., Han, J., Zhao, X., et al. (2006, Junho). Development of a 45 kVA Single Phase Model HTS Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 16, 2, pp. 1477-1480.

Wang, Y., Li, H, Zhao, X., et al. (2004, Fevereiro). A single phase model 9 kVA high-temperature superconducting power transformer. *SUPERCONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 17, pp 1014-1017.

Wang, Y., Zhao, X., Han, J., et al. (2007, Junho). Development of a 630 kVA Three Phase HTS Transformer With Amorphous Alloy Cores. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 17, 2, pp. 2051-2054.

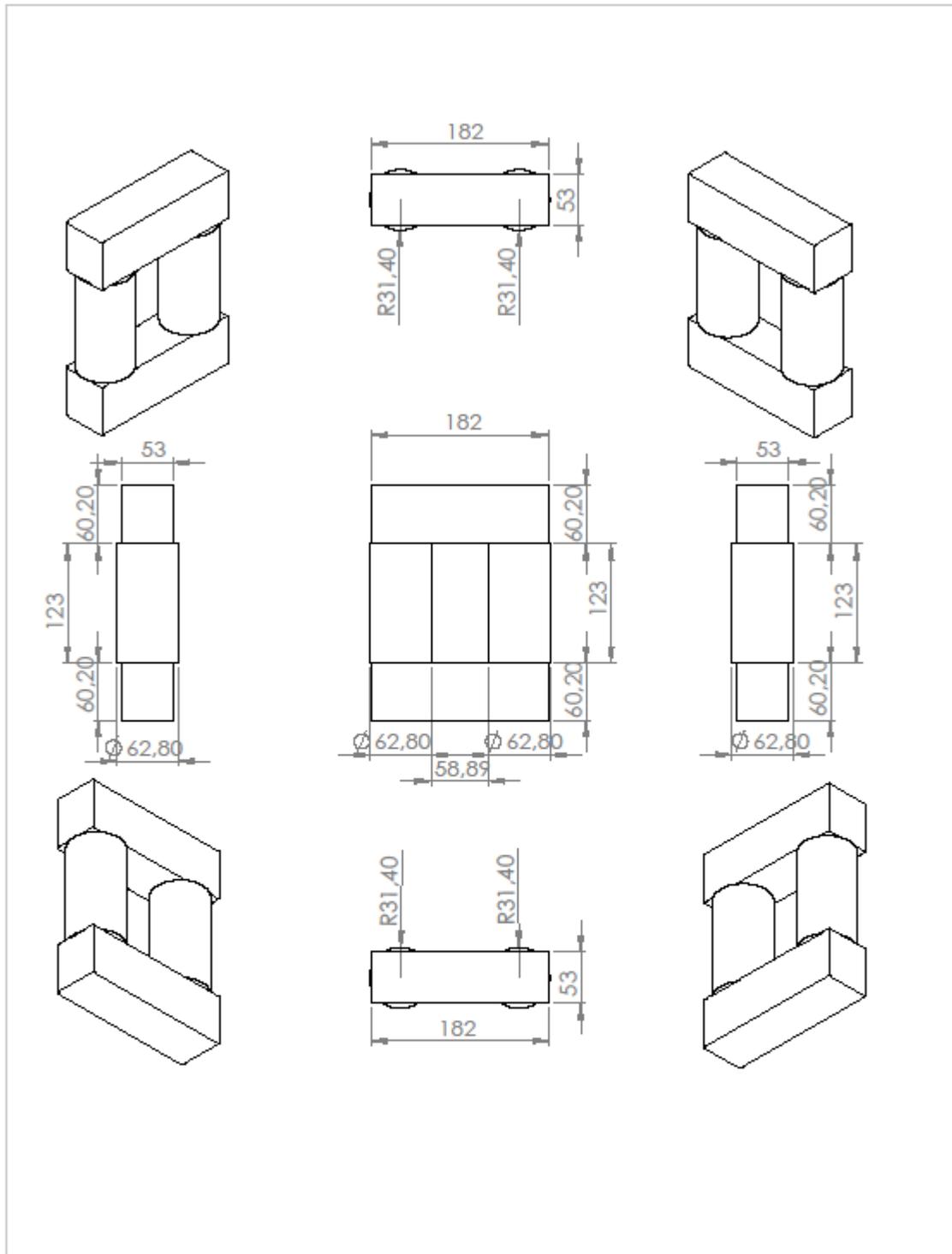
Wang, Y., Zhao, X., Han, J., et al. (2009, Março). Development and test in grid of 630 kVA three-phase high temperature superconducting transformer. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China* , 4, 1, pp. 104-113.

Weber, C. S., Reis, C. T., Hazelton, D. W., et al. (2005, Junho). Design and Operational Testing of a 5/10-MVA HTS Utility Power Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 15, 2, pp. 2210-2213.

Xiao, L., Dai, S., Lin, L., et al. (2012, Junho). Development of the World's First HTS Power Substation. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, 22, 3.

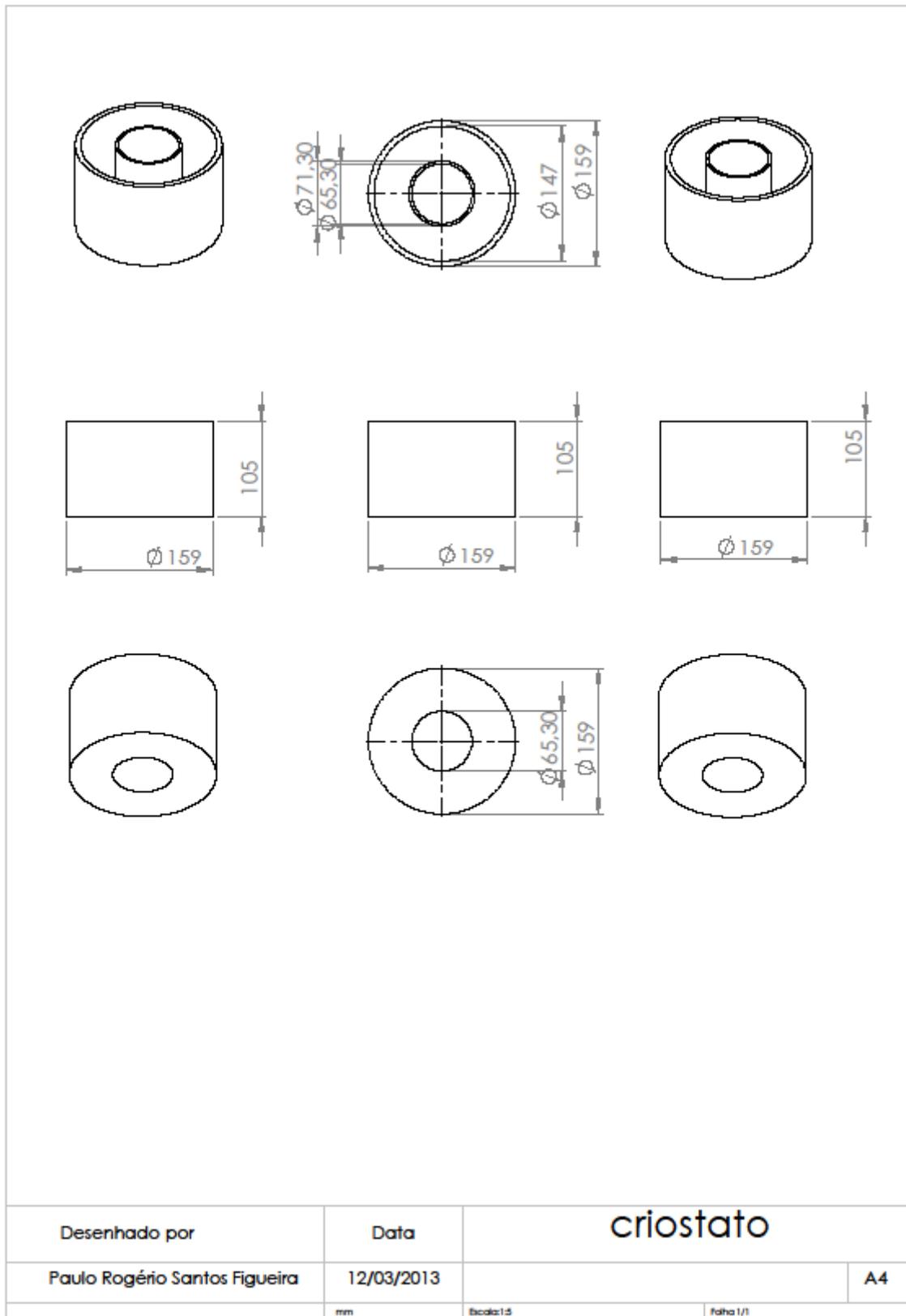
Apêndice

1 Núcleo ferromagnético

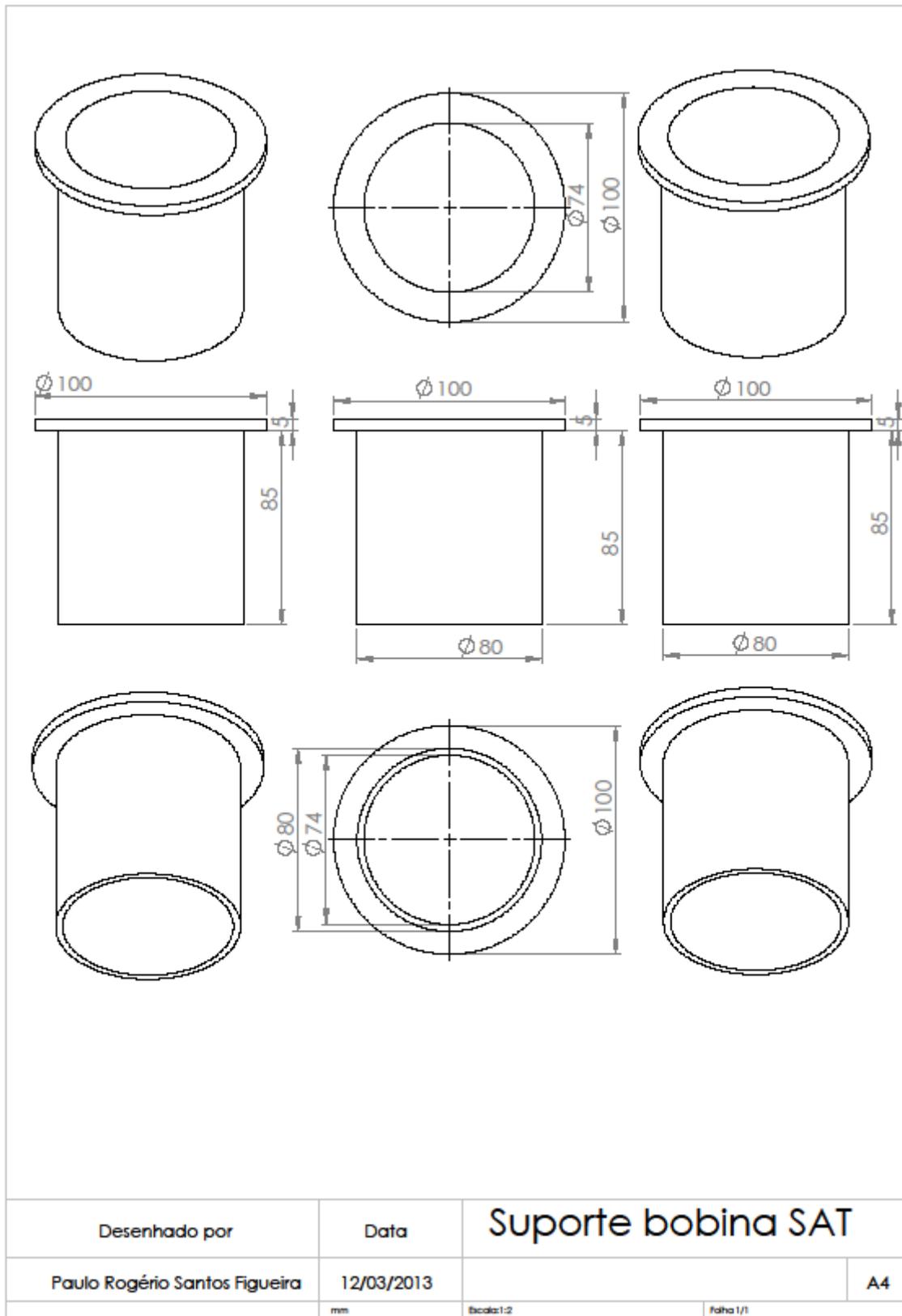


Desenhado por	Data	Núcleo ferromagnético	
Paulo Rogério Santos Figueira	12/03/2013		
mm	Escala: 1:5	Folha 1/1	

2 Crióstato



3 Suporte bobina SAT



4 Suporte bobina cobre

