

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

FERNANDO JORGE MONTEIRO DIAS

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DE
BOBINAS SUPERCONDUTORAS, LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO ALGUMAS
CONFIGURAÇÕES DE ISOLAMENTO**

Niterói
2015

FERNANDO JORGE MONTEIRO DIAS

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DE
BOBINAS SUPERCONDUTORAS, LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO ALGUMAS
CONFIGURAÇÕES DE ISOLAMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo

Coorientador: Dr. Alexander Polasek

Niterói

2015

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

D541 Dias, Fernando Jorge Monteiro

Avaliação das características elétricas e magnéticas de bobinas supercondutoras, levando em consideração algumas configurações de isolamento / Fernando Jorge Monteiro Dias. – Niterói, RJ : [s.n.], 2015.

105 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2015.

Orientadores: Guilherme Gonçalves Sotelo, Alexandre Polasek.

1. Supercondutividade. 2. Bobina supercondutora. I. Título.

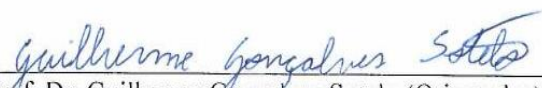
CDD 537.623

FERNANDO JORGE MONTEIRO DIAS

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DE
BOBINAS SUPERCONDUTORAS, LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO ALGUMAS
CONFIGURAÇÕES DE ISOLAMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

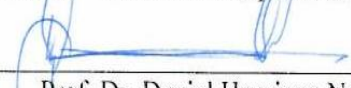
BANCA EXAMINADORA



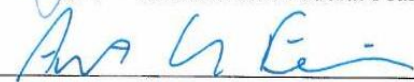
Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo (Orientador)
UFF – Universidade Federal Fluminense



Dr. Alexander Polasek (Coorientador)
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica



Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias
UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Antonio Carlos Ferreira
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói

2015

*Dedico este trabalho a minha família, a minha
namorada e aos meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) pelo apoio financeiro, sem o qual seria impossível prosseguir os meus estudos, mas também por todo o apoio técnico que fez com que esse trabalho fosse realizado. Do CEPEL, gostaria de agradecer especialmente o Marcio Sens e ao meu coorientador, Alexander Polasek, pela paciência, vontade e interesse em passar os conhecimentos e aos colegas do laboratório, Felipe Dicler e Luiz Felipe, pelo apoio nas simulações e na parte prática que ajudaram no desenvolvimento do trabalho. Ainda no CEPEL, gostaria de agradecer ao Rodrigo Dias, que se tornou meu amigo e sempre muito atencioso e bem humorado me auxiliou em todos os ensaios.

Agradeço também à Universidade Federal Fluminense (UFF) pela oportunidade do mestrado oferecida pelo departamento de Engenharia de Telecomunicações e ao departamento de Engenharia Elétrica com o intuito de desenvolver pessoas mais capacitadas para o mercado, que cada dia se torna mais exigente. Da universidade, um agradecimento especial ao meu Orientador Guilherme Sotelo que me incentivou desde o começo, fazendo acreditar que seria possível, mas também aos companheiros do Laboratório de Supercondutividade da UFF, Felipe, Davi, Walter e Paulo, pelo apoio na realização de alguns experimentos e a todos os professores pelos ensinamentos durante esse período de mestrado.

À equipe do Laboratório de Aplicação de Supercondutores (LASUP) por ter colocado à disposição seus equipamentos para a execução de alguns ensaios.

Aos amigos, pela motivação e apoio em momentos de dificuldade. Em especial ao Luis Micahel e ao Hernani Lopes, pelas interessantes discussões e pela sempre disponibilidade em me ajudar em qualquer situação, além da amizade sincera.

Aos meus pais, Jorge Dias e Claudina Dias pelos ensinamentos, pelo sacrifício e pelo apoio nos momentos mais difíceis.

Aos meus familiares, em especial ao meu irmão João Evangelista, minha cunhada Vera Regina e meus sobrinhos João Vitor e Anna Beatriz que me ajudaram quando mais precisava.

À minha namorada Karine Matos que faz tudo ter sentido na minha vida.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do
trabalho é no dicionário. ”

Albert Einstein

RESUMO

Equipamentos e dispositivos supercondutores para o setor elétrico estão em contínuo desenvolvimento, tais como cabos, transformadores, motores e limitadores de corrente de curto-circuito. A maioria destas aplicações utiliza o fio supercondutor na forma de bobinas. As bobinas supercondutoras normalmente usam fios isolados, mas alguns autores têm proposto a construção de bobinas supercondutoras sem isolamento para aplicações em corrente contínua. As possíveis vantagens de uma bobina sem isolamento seriam: operação em correntes mais elevadas, maior integridade mecânica e melhoria da propagação de calor. Contudo, bobinas sem isolamento precisam ser carregadas e descarregadas mais lentamente que bobinas isoladas. Neste contexto, três bobinas supercondutoras de panqueca dupla foram construídas e testadas, apresentando as seguintes topologias: bobina com isolamento, bobina sem isolamento e bobina sem isolamento com um fio de cobre entre as espiras supercondutoras. Alguns testes foram realizados com essas topologias de bobina. Os resultados indicaram que as bobinas sem isolamento apresentam maior estabilidade em correntes um pouco acima da corrente crítica (I_c). A ausência de isolamento elétrico permite que correntes acima de I_c sejam desviadas no sentido radial da bobina através do contato entre espiras adjacentes. Do mesmo modo, o calor excessivo gerado por pontos quentes pode também ser mais facilmente dissipado. Essas características motivaram o estudo de bobinas supercondutoras com e sem isolamento no presente trabalho.

Palavras-chave: Bobinas supercondutoras; Bobinas supercondutoras com isolamento; Bobinas supercondutoras sem isolamento; Fios supercondutores.

ABSTRACT

The development of electrical power equipment with superconducting wires is growing, including devices as cables, transformers, motors, fault current limiters and others. Most of these applications have the superconducting wire assembled in a coil design. Superconducting coils use insulated wires, but some authors have proposed to construct non-insulated superconducting coils for DC applications. Possible advantages of setting up a coil without insulation are: higher operating currents, better mechanical integrity and the improvement of heat propagation. However, non-insulated coils have no insulation resistance, which results in low charge and discharge rate of the coil. In this context, double pancake superconducting coils were constructed and tested, presenting the following topologies: insulated coil, non-insulated coil, non-insulated coil with a copper wire between superconducting turns. Some tests were carried out in these coils with different topologies. The results indicated that the non-insulated coils have greater stability in current a little above the critical current (I_c). Currents above the critical current may be radially diverted from its original path through the contact between adjacent turns. In addition, excessive heat generated by hot spots may also be automatically diverted through turn-to-turn contact in non-insulated coils. Those characteristics motivated the study of superconducting coils with and without insulation in the present work.

Keywords: Superconducting coils; Insulated superconducting coils; Non-insulated superconducting coils; Superconducting wires.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: ILUSTRAÇÃO DA SUPERFÍCIE QUE REPRESENTA A REGIÃO SUPERCONDUTORA COM OS LIMITES CRÍTICOS DE TEMPERATURA, DENSIDADE DE CORRENTE E CAMPO MAGNÉTICO, NO INTERIOR DO QUAL UM MATERIAL PERMANECE SUPERCONDUTOR.....	3
FIGURA 2.2: COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA RESISTIVIDADE DOS METAIS COM OS SUPERCONDUTORES.....	5
FIGURA 2.3: DIFERENCIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS LINHAS DE FLUXO MAGNÉTICO EM UM CONDUTOR PERFEITO E UM MATERIAL SUPERCONDUTOR COM $T < T_c$. ADAPTADO DE [15].....	5
FIGURA 2.4: DIAGRAMA DE FASE PARA OS SUPERCONDUTORES: A) TIPO I E B) TIPO II.....	7
FIGURA 2.5: REDE DE ABRIKOSOV EM UM SUPERCONDUTOR DO TIPO II. ADAPTADA DE [21].	7
FIGURA 2.6: CLASSIFICAÇÃO DOS SUPERCONDUTORES, EM (A) TIPO I E (B) TIPO II, PELOS PARÂMETROS κ E λ . ADAPTADA DE [11].....	8
FIGURA 2.7: COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS λ E κ NO ESTADO MISTO DE UM SUPERCONDUTOR DO TIPO II. ADAPTADA DE [20].....	10
FIGURA 2.8: CURVA NORMALIZADA DA VARIAÇÃO DA MAGNETIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO, PELO CAMPO MAGNÉTICO CRÍTICO, DE FORMA A CLASSIFICAR OS SUPERCONDUTORES EM TIPO I ($\kappa < 0,707$) E EM TIPO II ($\kappa > 0,707$) [26].	10
FIGURA 2.9: SUPERFÍCIE COM OS LIMITES TEÓRICOS E PRÁTICOS DOS SUPERCONDUTORES DO TIPO II. ADAPTADA DE [15] [21].	11
FIGURA 2.10: FORÇA DE LORENTZ INDUZIDA NO VÓRTICE. ADAPTADA DE [15].....	12
FIGURA 2.11: INTENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA COM H_{c2} E H_{irr} DO BSCCO E DO YBCO. ADAPTADA DE [15] [30].....	15
FIGURA 2.12: (A) ESBOÇO DA CURVA $E - J$ PARA A DETERMINAÇÃO DAS FASES DE TRANSIÇÃO SUPERCONDUTORA/NORMAL, (B) CURVA NORMALIZADA EM ESCALA LOGARÍTMICA MOSTRANDO OS TRÊS ESTÁGIOS ATÉ ATINGIR A TRANSIÇÃO COMPLETA. ADAPTADA DO [28].....	16
FIGURA 2.13: ARRANJOS DE BOBINAS: (A) BOBINA SOLENÓIDE E (B) BOBINA TIPO PANQUECA [4].....	17
FIGURA 2.14: BOBINA SUPERCONDUTORA DE BI2223: (A) COM ISOLAMENTO E (B) SEM ISOLAMENTO [4].....	22

FIGURA 2.15: CORRENTE E CAMPO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DO TEMPO NAS BOBINAS: (A) CORRENTE NAS BOBINAS, (B) CAMPO MAGNÉTICO NA BOBINA SEM ISOLAMENTO E (C) CAMPO MAGNÉTICO NA BOBINA COM ISOLAMENTO [4].....	22
FIGURA 2.16: TENSÃO NOS TERMINAIS DAS BOBINAS: (A) BOBINA SEM ISOLAMENTO E (B) BOBINA COM ISOLAMENTO. O GRÁFICO EM VISTA AMPLIADA É NO PATAMAR DE 120 A [4].	23
FIGURA 2.17: RESULTADOS DA BOBINA DE PANQUECA DUPLA DE BSCCO COM ISOLAMENTO: (A) CORRENTE NO TEMPO E (B) CAMPO MAGNÉTICO NO TEMPO [54].....	24
FIGURA 2.18: RESULTADOS DA BOBINA DE PANQUECA DUPLA BSCCO SEM ISOLAMENTO: (A) CORRENTE NO TEMPO, (B) CAMPO MAGNÉTICO NO TEMPO E (C) TENSÃO NO TEMPO [54].....	24
FIGURA 2.19: RESULTADOS DA BOBINA DE PANQUECA DUPLA COM REVESTIMENTO E COM ISOLAMENTO: (A) CORRENTE NO TEMPO E (B) CAMPO MAGNÉTICO NO TEMPO [54].....	25
FIGURA 2.20: RESULTADOS DA BOBINA DE PANQUECA DUPLA COM REVESTIMENTO E SEM ISOLAMENTO: (A) CORRENTE NO TEMPO, (B) CAMPO MAGNÉTICO NO TEMPO E (C) TENSÃO NO TEMPO [54].	25
FIGURA 2.21:(A) RAMPA DE CORRENTE, (B) E (C) CAMPO AXIAL CENTRAL EM FUNÇÃO DO TEMPO NA BOBINA COM ISOLAMENTO E SEM ISOLAMENTO, RESPECTIVAMENTE [5].	27
FIGURA 2.22: TENSÃO NOS TERMINAIS DAS BOBINAS: (A) COM ISOLAMENTO E (B) SEM ISOLAMENTO [5].	27
FIGURA 3.1: FONTE DE CORRENTE CONTÍNUA ESTABILIZADA, MODELO ARGANTIX KDC 500 A/30V.	30
FIGURA 3.2: NANOVOLTMETRO DA KEITHLEY 2182A.....	31
FIGURA 3.3: PORTA AMOSTRA USADO NAS CARACTERIZAÇÕES.	31
FIGURA 3.4: PULSOS DE CORRENTE COM 500 MS E INTERVALOS DE 5S COM A FONTE DESLIGADA.	33
FIGURA 3.5: FIO SUPERCONDUTOR DA SUPERPOWER, CAMADA POR CAMADA COM AS DIMENSÕES ESPECIFICADAS [59].	34
FIGURA 3.6: FIO SUPERCONDUTOR DA SUPEROX, CAMADA POR CAMADA COM AS DIMENSÕES ESPECIFICADAS [60].	35
FIGURA 3.7: FIO SUPERCONDUTOR DA SUNAM, CAMADA POR CAMADA COM AS DIMENSÕES ESPECIFICADAS [61].	35

FIGURA 3.8: CURVA $V \times I$ DE CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES: FIO DA SUPERPOWER, FIO DA SUPEROX, FIO DA SUNAM ISOLADO COM KAPTON E FIO DA SUNAM SEM KAPTON.	37
FIGURA 3.9: DIREÇÃO DO FLUXO DE CORRENTE EM UM SUPERCONDUTOR 2G HTS E SUAS RESPECTIVAS DIREÇÕES DE CAMPO MAGNÉTICO INCIDENTE [62] [63]	38
FIGURA 3.10: DECLÍNIO DA CORRENTE CRÍTICA COM A INCIDÊNCIA DE CAMPO MAGNÉTICO PERPENDICULAR A SUPERFÍCIE DO FIO EM TEMPERATURAS DISTINTAS [CORTESIA DA SUNAM 2015].	39
FIGURA 3.11: FONTE DE CORRENTE CONTÍNUA DA LAKE SHORE, MODELO 643.	40
FIGURA 3.12: ELETROMAGNETO COM REFRIGERAÇÃO A ÁGUA.....	40
FIGURA 3.13: CRIOSTATO E A BOMBA DE VÁCUO.	41
FIGURA 3.14: SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES COM CAMPO MAGNÉTICO INCIDENTE.	41
FIGURA 3.15: CRIOSTATO ABERTO MOSTRANDO O PORTA AMOSTRA.	42
FIGURA 3.16: CALIBRAÇÃO DO ELETROMAGNETO COM UM GAP DE 32 MM.	42
FIGURA 3.17: CARACTERIZAÇÃO DOS FIOS SUPERCONDUTORES COM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO NA DIREÇÃO PARALELA À FACE DO FIO E PERPENDICULAR À CORRENTE, FIO DA SUPERPOWER, FIO DA SUPEROX E FIO DA SUNAM ISOLADO COM KAPTON, RESPECTIVAMENTE.	44
FIGURA 3.18: DECAIMENTO DA CORRENTE CRÍTICA COM O CAMPO MAGNÉTICO PARALELO A SUPERFÍCIE DO FIO.	45
FIGURA 3.19: VALORES DO ÍNDICE n NOS FIOS SUPERCONDUTORES COM CAMPO MAGNÉTICO PARALELO APLICADO.	45
FIGURA 3.20: CARACTERIZAÇÃO DOS FIOS SUPERCONDUTORES COM CAMPO MAGNÉTICO INCIDENTE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR A FACE DO FIO, DIREÇÃO C, FIO DA SUPERPOWER, FIO DA SUPEROX E FIO DA SUNAM ISOLADA COM KAPTON, RESPECTIVAMENTE.	46
FIGURA 3.21: DECAIMENTO DA CORRENTE CRÍTICA COM O CAMPO MAGNÉTICO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE DO FIO.	47
FIGURA 3.22: VALORES DO ÍNDICE n NOS FIOS SUPERCONDUTORES COM CAMPO MAGNÉTICO PERPENDICULAR APLICADO.....	47
FIGURA 4.1: PROTÓTIPOS DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS.....	48

FIGURA 4.2: PROJETO DO CARRETEL DAS BOBINAS DE PANQUECA DUPLA. ADAPTADA DE [63].	49
FIGURA 4.3: TERMINAL DE CORRENTE E PEÇA DE ENCAIXE DO FIO SUPERCONDUTOR, ADAPTADA [63].	50
FIGURA 4.4: CARRETEL SOBRE A BASE COM O ESPAÇADOR, OS TERMINAIS E A PEQUENA PEÇA DE COBRE.	51
FIGURA 4.5: CONFIGURAÇÃO DE ENCAIXE DO FIO SUPERCONDUTOR NO TERMINAL DE CORRENTE COM FOLHA DE ÍNDIO.	51
FIGURA 4.6: FIO DE COBRE UTILIZADO NO ENROLAMENTO DA BOBINA NIC.	52
FIGURA 4.7: FIO SUPERCONDUTOR DA SUÑAM COM E SEM KAPTON.	52
FIGURA 4.8: MESA BOBINADEIRA DO LASUP.	53
FIGURA 4.9: CARRETEL DA SUÑAM E DA SUPERPOWER PARA TRANSPORTE DE FIOS SUPERCONDUTORAS.	53
FIGURA 4.10: BOBINA SUPERCONDUTORA COM ISOLAMENTO.	55
FIGURA 4.11: BOBINA SEM ISOLAMENTO.	55
FIGURA 4.12: BOBINA SEM ISOLAMENTO COM O FIO DE COBRE ENTRE AS ESPIRAS.	56
FIGURA 5.1: CONTATO DE TENSÃO NA BOBINA NI.	58
FIGURA 5.2: CURVA $V \times I$ DA BOBINA I.	58
FIGURA 5.3: CURVA $V \times I$ DA BOBINA NI.	59
FIGURA 5.4: CURVA $V \times I$ DA BOBINA NIC.	60
FIGURA 5.5: MESA DE MAPEAMENTO DE CAMPO MAGNÉTICO DO LASUP.	61
FIGURA 5.6: MAPEAMENTO DE CAMPO MAGNÉTICO DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS: (A) I, (B) NI E (C) NIC.	62
FIGURA 5.7: VISTA SUPERIOR DA BOBINA DOUBLE PANCAKE, COMO OS EIXOS A, B E C QUE CORRESPONDEM A Y, Z E X DO SISTEMA DE MAPEAMENTO, RESPECTIVAMENTE.	63
FIGURA 5.8: COMPORTAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO NA DIREÇÃO CENTRAL DO EIXO X DA BOBINA COM CENTRO EM ZERO E COM 33 MM DE RAIOS.	64
FIGURA 5.9: SISTEMA DE MAPEAMENTO DE CAMPO MAGNÉTICO DA UFF.	65

FIGURA 5.10: RAMPA DE CORRENTE REQUISITADA DA FONTE, COM PATAMARES DE 20 EM 20 A, USADO NO ENSAIO DE CARGA E DESCARGA DAS BOBINAS I, NI E NIC.....	66
FIGURA 5.11: CAMPO MAGNÉTICO CENTRAL EM FUNÇÃO DO TEMPO NA BOBINA I.....	67
FIGURA 5.12: CAMPO MAGNÉTICO CENTRAL EM FUNÇÃO DO TEMPO NA BOBINA NI.	68
FIGURA 5.13: CAMPO MAGNÉTICO CENTRAL EM FUNÇÃO DO TEMPO NA BOBINA NIC.	68
FIGURA 5.14: TENSÃO NOS TERMINAIS DA BOBINA I EM FUNÇÃO DO TEMPO.	69
FIGURA 5.15: TENSÃO NOS TERMINAIS DA BOBINA NI EM FUNÇÃO DO TEMPO. A JANELA É UMA VISTA AMPLIADA DO PATAMAR DE 120A.	70
FIGURA 5.16: TENSÃO NOS TERMINAIS DA BOBINA NIC EM FUNÇÃO DO TEMPO. A JANELA É UMA VISTA AMPLIADA DO PATAMAR DE 132A.	71
FIGURA 5.17: CIRCUITO MONTADO PARA O LEVANTAMENTO DAS PERDAS AC NAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS I, NI E NIC.....	72
FIGURA 5.18: TELA DO OSCILOSCÓPIO COM OS SINAIS ELÉTRICOS DE TENSÃO E CORRENTE DA BOBINA SUPERCONDUTORA COM ISOLAMENTO, E SUAS RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS.	73
FIGURA 5.19: LEVANTAMENTO DAS PERDAS RESISTIVAS DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS EM AC.	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: MATERIAIS SUPERCONDUTORES COM T_c ACIMA DA TEMPERATURA DO NITROGÊNIO LÍQUIDO, 77K. ADAPTADA DE [24].....	13
TABELA 3.1: ESPECIFICAÇÕES DE FIOS SUPERCONDUTORAS.	36
TABELA 3.2: VALORES DE CORRENTE, COM O RESPECTIVO CAMPO MAGNÉTICO GERADO PELOS POLOS DO ELETROMAGNETO, PARA AS CARACTERIZAÇÕES DOS FIOS.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS

2G – Segunda Geração

HTS – High Temperature Superconductor

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

I – Isolamento Kapton

NI – Sem Isolamento

NIC – Sem Isolamento com fita de Cobre

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

UFF – Universidade Federal Fluminense

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

LASUP – Laboratório de Aplicações de Supercondutores da UFRJ

MEF – Método de Elementos Finitos

LN₂ – Nitrogênio Líquido

TC – Transformador de Corrente

LTS – Low Temperature Superconductor

LISTA DE SÍMBOLOS

T – Temperatura

J – Densidade de Corrente de Transporte

H – Campo Magnético

T_c – Temperatura Crítica

H_c – Campo Crítico

J_c – Densidade de Corrente Crítica

I_c – Corrente Crítica

λ_L – Profundidade de Penetração de London

ξ – Comprimento de Coerência

k – Constante de Ginzburg-Landau

H_{c1} – Primeiro Campo Magnético Crítico do Supercondutor do Tipo II

H_{c2} – Segundo Campo Magnético Crítico do Supercondutor do Tipo II

η_s – Densidade de Superelétrons

h – Constante de Planck

e – Carga Elementar

Φ_0 – Fluxo Magnético Quantizado

F_p – Force Pinning

H_{irr} – Campo Magnético Irreversível

J_d – Densidade de Corrente de Depareamento

F_L – Força de Lorentz

E – Campo Elétrico

R_R – Resistência Radial

R_θ – Resistência Azimutal

L_{HTS} – Indutância do Enrolamento HTS

V – Tensão

I – Corrente

N – Número de Espira de uma Bobina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	2
1.2. OBJETIVO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DESSE MANUSCRITO.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. O FENÔMENO DA SUPERCONDUTIVIDADE.....	3
2.2. PROPRIEDADES DOS SUPERCONDUTORES	4
2.2.1. Resistividade Nula	4
2.2.2. Efeito Meissner.....	5
2.3. TIPOS DE SUPERCONDUTORES (TIPO I E TIPO II).....	6
2.3.1. Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência	8
2.3.2. A energia livre de superfície e a constante de Ginzburg-Landau	9
2.4. LIMITES TEÓRICOS E PRÁTICOS DOS SUPERCONDUTORES	11
2.5. SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA	12
2.5.1. Fios supercondutores de primeira geração (1G).....	14
2.5.2. Fios Supercondutores de segunda geração (2G).....	14
2.6. DENSIDADE DE CORRENTE CRÍTICA EM SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA (HTS)	15
2.7. BOBINAS SUPERCONDUTORAS	17
2.7.1. Aspectos de bobinas supercondutoras	18
2.7.1.1. Bobinas Supercondutoras com Isolamento	19
2.7.1.2. Bobinas Supercondutoras sem isolamento.....	21
3. CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES 2G HTS.....	30
3.1. CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES 2G HTS (SEM CAMPO MAGNÉTICO INCIDENTE)	30
3.1.1. Aparatos experimentais	30
3.1.1.1. Fonte de corrente contínua estabilizada	30
3.1.1.2. Nanovoltímetro	31
3.1.1.3. Porta amostra.....	31
3.1.2. Procedimentos de Ensaios.....	32
3.1.3. Especificações dos Fios e resultados obtidos	34

3.2. CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES 2G HTS (COM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO).....	38
3.2.1. Equipamentos utilizados para medir I_c com campo magnético externo	40
3.2.1.1. <i>Fonte de corrente contínua e o Eletromagneto</i>	40
3.2.1.2. <i>Criostato</i>	41
3.2.2. Procedimentos de Ensaio	42
3.2.3. Resultados das caracterizações.....	43
4. PROTÓTIPOS DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS.....	48
4.1. CARRETÉIS.....	48
4.2. TERMINAIS DE CORRENTE	50
4.3. FIO DE COBRE E FIOS SUPERCONDUTORES	52
4.4. MESA BOBINADEIRA	53
5. ENSAIOS DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS	57
5.1. CARACTERIZAÇÕES DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS EM CORRENTE CONTÍNUA (SEM CAMPO MAGNÉTICO INCIDENTE)	57
5.2. MAPEAMENTO DE CAMPO MAGNÉTICO NAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS	60
5.2.1. Sistema de mapeamento de campo magnético	61
5.2.2. Realização dos ensaios do mapeamento de campo.....	61
5.2.3. Procedimentos de ensaios e resultados alcançados	62
5.3. MEDIDAS DE CARGA E DESCARGA DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS.....	65
5.3.1. Procedimentos de ensaio	65
5.3.2. Resultados obtidos	66
5.4. LEVANTAMENTO DAS PERDAS RESISTIVAS EM CORRENTE ALTERNADA DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS.....	71
5.4.1. Realizações dos ensaios.....	72
5.4.2. Procedimento de ensaio e Resultados obtidos	72
5.5. ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	75
5.5.1. Caracterização e mapeamento das bobinas supercondutoras	75
5.5.2. Carga e descarga das bobinas	76
5.5.3. Levantamento das Perdas Resistivas em corrente alternada	77
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	78
6.1. CONCLUSÃO	78
6.2. TRABALHOS FUTUROS.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da demanda de energia elétrica nas grandes metrópoles, devido ao aumento da população e ao desenvolvimento das tecnologias no mundo ao longo dos anos, levou à necessidade do aumento da capacidade dos sistemas que os abastecem, visando uma maior qualidade e confiabilidade [1].

Dessa forma, os investimentos em projetos de pesquisas ganharam força no cenário mundial, buscando alternativas para desenvolvimento de equipamentos mais eficientes. Uma das áreas com um grande avanço nesse cenário é a da supercondutividade, pois, com a descoberta dos fios supercondutores de segunda geração [2], foi possível a produção em grande escala, na ordem de quilômetros, que possibilitou a ampliação desses horizontes. Assim, os equipamentos desenvolvidos utilizando esses supercondutores ganharam força para aplicação nos sistemas de energia elétrica. Aplicações como transformadores supercondutores, limitadores de corrente de curto circuito, mancais magnéticos e máquinas supercondutoras vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo e a perspectiva de aplicação nos sistemas de energia é elevada [3].

Para a construção desses equipamentos utilizando supercondutores, é de extrema relevância avaliar as características elétricas e magnéticas das bobinas supercondutoras que geralmente os constituem. Essas bobinas apresentam algumas características singulares, e por esse motivo surge à necessidade de estudos mais aprofundados. Dentre os possíveis estudos, as características de isolamento e não isolamento de bobinas tem ganhado ênfase na literatura devido a algumas vantagens das bobinas sem isolamento em relação aos seus congêneres com isolamento, que são geralmente utilizados nos equipamentos [4], [5], [6].

Nesse âmbito, no presente trabalho serão abordadas algumas configurações de isolamento e não isolamento de bobinas supercondutoras. Para isto, foram construídas três bobinas com fio supercondutor de segunda geração (2G) de alta temperatura crítica (HTS) e com configurações de isolamento distintas, uma com isolamento Kapton¹, uma sem isolamento e uma sem isolamento com um fio de cobre entre as espiras, para a avaliação de suas características.

¹ É um filme poliamida flexível para utilização em aplicações que envolvem temperaturas muito elevadas (de 400°C) ou muito baixas (de -269°C).

1.1. MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de equipamentos elétricos com fios supercondutores está em progressão, devido à maior eficiência e menor volume e peso desses em relação aos com fios condutores. Como grande parte desses equipamentos tem os supercondutores arranjados sob a forma de bobinas, o estudo dessas se torna essencial [7].

1.2. OBJETIVO

Avaliar as características elétricas e magnéticas de bobinas supercondutoras com e sem isolamento entre as espiras, evidenciando em corrente contínua (CC) se as bobinas supercondutoras sem isolamento são vantajosas comparadas às bobinas com isolamento, visando aumentar a estabilidade térmica e, consequentemente a corrente de operação e a integridade mecânica.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Para atingir o objetivo apresentado, este trabalho está segmentado em seis capítulos. Neste primeiro, é feita a introdução com o objetivo, a motivação e a apresentação do estudo. No segundo capítulo, é realizada a revisão bibliográfica com os fundamentos da supercondutividade e das bobinas supercondutoras. Nessa revisão são detalhadas as características dos materiais supercondutores e das bobinas com e sem isolamento. No terceiro capítulo serão apresentadas as caracterizações de algumas amostras de fios supercondutores, de fabricantes distintos, com e sem campo magnético incidente, e, os aparatos necessários para essas caracterizações. O seguinte, capítulo quatro, mostrará os protótipos das bobinas supercondutoras, com todos os materiais utilizados na construção dos mesmos. O capítulo 5 relata a análise experimental das bobinas supercondutoras com e sem isolamento e as respectivas discussões dos resultados obtidos. Por fim, no sexto e último capítulo, encontram-se as conclusões finais e trabalhos futuros sugeridos para a continuidade da exploração dos princípios avaliados nesse trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, serão abordados alguns conceitos referentes à supercondutividade, apresentando alguns fundamentos teóricos ao longo da história e evidenciando o potencial dos materiais supercondutores em bobinas.

2.1. O FENÔMENO DA SUPERCONDUTIVIDADE

A obtenção de hélio líquido por Heike Kamerlingh Onnes no laboratório de criogenia da Universidade de Leiden, Holanda, em 1908, que lhe rendeu o prêmio Nobel da física, foi pioneira para o surgimento do fenômeno da supercondutividade [8]. A liquefação do hélio permitiu que fosse medida a resistência elétrica de alguns metais em temperaturas muito baixas. Em 1911, ao investigar as propriedades elétricas do mercúrio a baixas temperaturas, Onnes observou que a resistência não caía continuamente como o esperado. Ao invés disso, em torno da temperatura de 4,2 K, a resistência caía abruptamente a um valor imensurável [9]. Surgiu então a supercondutividade, um novo estado da matéria, onde os materiais não apresentavam resistência elétrica.

Após a descoberta desse fenômeno, Onnes continuou seus estudos e observou que além da temperatura, um material supercondutor poderia ser suprimido por outros dois parâmetros, o campo magnético e a densidade de corrente que o material supercondutor transporta [8]. A figura 2.1 mostra a relação entre esses três parâmetros e indica os limites críticos (temperatura crítica - T_c , campo magnético crítico - H_c , e densidade de corrente crítica - J_c) onde o material deixa de ser supercondutor.

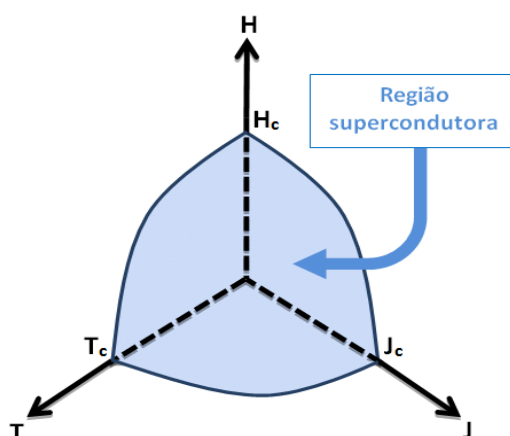


Figura 2.1: Ilustração da superfície que representa a região supercondutora com os limites críticos de temperatura, densidade de corrente e campo magnético, no interior do qual um material permanece supercondutor.

A supercondutividade atraiu a atenção dos pesquisadores dessa época que não mediram esforços para investigar a fundo o comportamento desses materiais.

2.2. PROPRIEDADES DOS SUPERCONDUTORES

A supercondutividade, por ser um estado da matéria, apresenta algumas propriedades específicas. A inexistência de resistividade elétrica de um material supercondutor foi a primeira propriedade evidenciada, descrita por Onnes em 1911. A segunda propriedade que descreve um supercondutor é o efeito Meissner, retratado por Meissner e Ochsenfeld em 1933 [10], que consiste na exclusão total do campo magnético do interior de um supercondutor.

2.2.1. Resistividade Nula

A resistividade elétrica de todos os metais e ligas diminuem quando eles são resfriados [11], mas alguns desses metais e ligas apresentam uma resistividade nula quando refrigerados abaixo de uma determinada temperatura, denominada de temperatura crítica (T_c). Essa propriedade é característica dos materiais supercondutores. Por essa característica, estes materiais não apresentam perdas elétricas quando flui uma corrente CC, só apresentam pequenas perdas em corrente alternada (CA) [12].

Em um condutor comum a corrente é definida pelo movimento de cargas (elétrons de condução), que estão livres para se mover através do material. Em uma rede cristalina perfeita os elétrons poderiam se mover sem apresentar perdas. Entretanto, devido às impurezas e a vibração dos átomos, parte dos elétrons livres colide com a rede, o que acaba produzindo calor (efeito Joule) e gera a resistência elétrica [13].

No material supercondutor a corrente flui pelos Pares de Cooper que são formados na transição do material do estado normal para o estado supercondutor, onde os elétrons formam pares estáveis. Esses pares combinam seus movimentos com outros pares de elétrons para deslocarem sem resistência [14].

A figura 2.2 apresenta a comparação do comportamento da resistividade dos metais com os supercondutores.

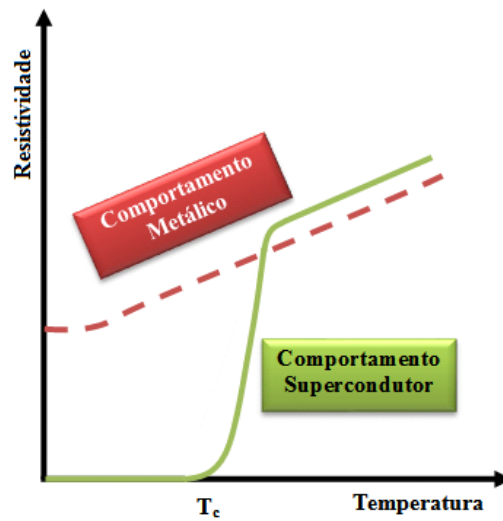


Figura 2.2: Comparação do comportamento da resistividade dos metais com os supercondutores.

2.2.2. Efeito Meissner

Além da resistividade nula, durante investigações realizadas por Meissner e Ochsenfeld, foi descoberta outra propriedade dos materiais supercondutores, o diamagnetismo perfeito. Esse fenômeno foi denominado Efeito Meissner, ilustrado na figura 2.3, que permite diferenciar um supercondutor de um “condutor perfeito”.

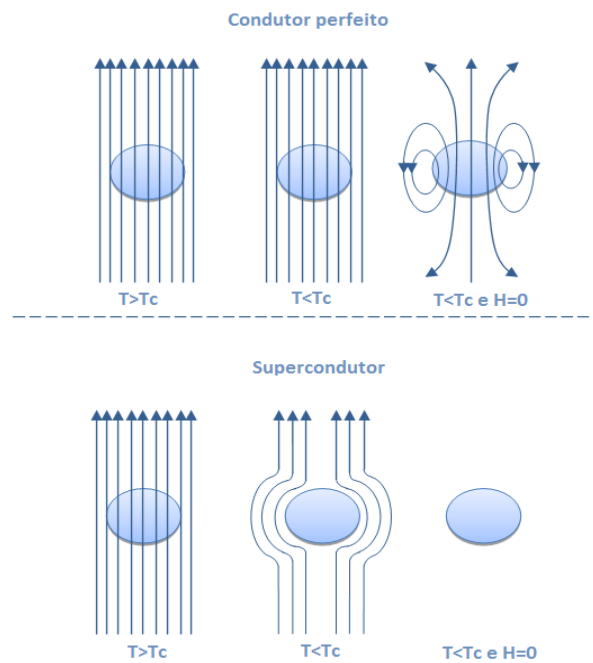


Figura 2.3: Diferenciação do comportamento das linhas de fluxo magnético em um condutor perfeito e um material supercondutor com $T < T_c$. Adaptado de [15].

Na figura 2.3, considerando o caso hipotético de um condutor perfeito na presença de campo magnético em $T > T_c$, há penetração de fluxo magnético no interior do material. Quando o material é resfriado a uma temperatura $T < T_c$, o fluxo magnético permanece inalterado. Mas, se reduzido o campo magnético para zero, devido às correntes persistentes induzidas, o fluxo magnético é mantido permanente no material.

Diferente do condutor perfeito, o supercondutor consiste na exclusão do fluxo magnético do interior do material quando a temperatura do mesmo fica abaixo de T_c . Isto acontece, porque no estado supercondutor surge no material uma magnetização contrária, gerada por correntes de blindagem que aparecem na superfície do material. Essa magnetização possui a mesma intensidade da densidade de fluxo externo, o que provoca o cancelamento total do fluxo magnético no interior do material. Por essa razão que os supercondutores se comportam como materiais diamagnéticos perfeitos [16], [17].

Para explicar esse efeito, alguns modelos foram desenvolvidos. Dentre esses, há o modelo fenomenológico desenvolvido pelos irmãos Fritz e Heinz London em 1935 [18], que conseguiram através de suas considerações empíricas explicarem esse efeito, sem desrespeitar as equações de Maxwell. Nessa modelagem, surge um conceito importante que é a profundidade de penetração de London λ_L , que representa quanto o campo magnético penetra no interior de um supercondutor.

Outra modelagem de tamanha importância também foi descrita por Fritz e Heinz London, que é o modelo de dois fluidos. Esse modelo consiste no princípio de que existem dois fluxos de elétrons, um de elétrons normais e outro de “superelétrons” [19], [20]. Os elétrons normais são afetados pelas impurezas e pela vibração da rede, obedecendo à lei de Ohm. Já os superelétrons, não perdem energia ao passarem pela rede cristalina, portanto, não contribuem para a resistência elétrica.

2.3. TIPOS DE SUPERCONDUTORES (TIPO I E TIPO II)

O efeito da expulsão do campo magnético no interior do supercondutor permite separar os supercondutores em dois tipos: tipo I e tipo II. Os supercondutores do tipo I somente podem estar no estado normal ou no estado supercondutor, conforme ilustrado no diagrama de fase da figura 2.4a. Portanto, não apresentam penetração de fluxo magnético no seu interior, ou seja, apresentam o efeito Meissner [21]. Existe outro tipo de supercondutores, denominados do tipo II, que mostram um comportamento diferente, pois, à medida que um

campo externo é aplicado no material, o fluxo magnético passa a penetrar de forma quantizada. A essa região onde há a penetração parcial do fluxo magnético denomina-se estado misto, como mostra o diagrama de fase da figura 2.4b.

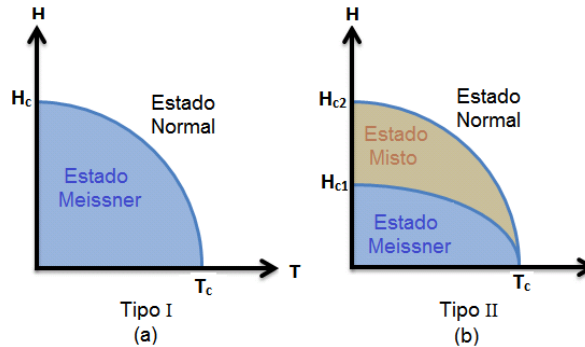


Figura 2.4: Diagrama de fase para os supercondutores: a) tipo I e b) tipo II.

Como observado na figura 2.4b, os supercondutores do tipo II dispõem de dois valores de campos críticos H_{c1} e H_{c2} . Quando o campo externo é abaixo do campo H_{c1} o supercondutor encontra-se no estado Meissner, comportando-se do mesmo modo que os supercondutores tipo I. Entre H_{c1} e H_{c2} , estado misto, existe uma penetração parcial do campo magnético. Acima do valor de H_{c2} , há uma transição do estado supercondutor para o estado normal.

No estado misto, existem regiões supercondutoras e regiões normais, por onde o fluxo magnético penetra de forma quantizada, em que cada quantum de fluxo é chamado de fluxóide ou vórtice (correntes de blindagem que circulam os fluxóides). Os fluxóides encontram-se distribuídos de forma Hexagonal na rede, conforme exposto por Abrikosov em 1957 [22]. Essa rede, denominada rede de Abrikosov, é mostrada na figura 2.5 dentro de um supercondutor do tipo II.

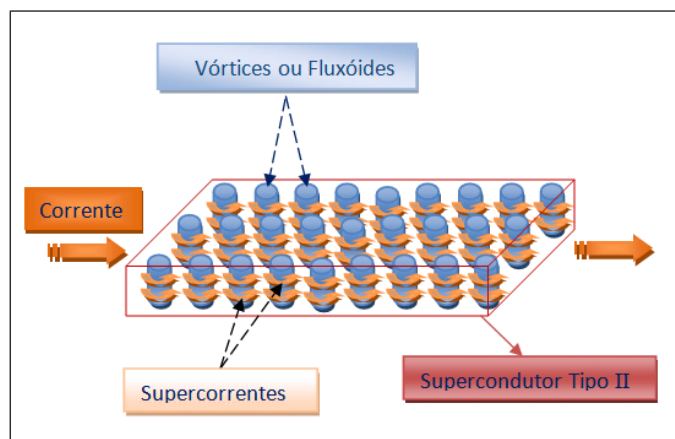


Figura 2.5: Rede de Abrikosov em um supercondutor do tipo II. Adaptada de [21].

Cada fluxóide visto na figura 2.5 apresenta um fluxo magnético quantizado ϕ_0 que é determinado da seguinte forma:

$$\phi_0 = \frac{h}{2e} = \frac{6,6262 \times 10^{-34}}{2 \times 1,6022 \times 10^{-19}} = 2,068 \times 10^{-15} \text{Weber}, \quad (2.1)$$

onde h é a constante de Planck e e representa a carga elementar.

Quando o campo magnético aumenta, o número de vórtices também aumenta, fazendo diminuir a distância entre eles. Então, se o campo magnético aumentar até atingir H_{c2} , a força de aprisionamento de fluxo (do inglês *Force pinning*, F_p) torna energeticamente impraticável a formação de novos vórtices, logo, a estrutura dos vórtices serão comprimidas e fluem juntas, destruindo a supercondutividade e todo o material passa para o estado normal [23].

Para melhor distinção e classificação dos supercondutores nesses dois tipos, existem dois parâmetros muito importantes, que serão descritos a seguir.

2.3.1. Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência

Os parâmetros relevantes que permitem classificar os supercondutores em tipo I e tipo II são: a profundidade de penetração (λ) e o comprimento de coerência (ξ). A primeira é definida como a distância média característica, no qual o campo magnético externo penetra a região supercondutora a partir da interface com a região normal [21]. O segundo pode ser exposto como a distância entre os elétrons que se agrupam formando os pares de Cooper [24], mas que também pode ser interpretado como o parâmetro que mede a correlação entre os portadores de carga [20]. A figura 2.6 mostra a classificação dos supercondutores com relação aos parâmetros ξ e λ .

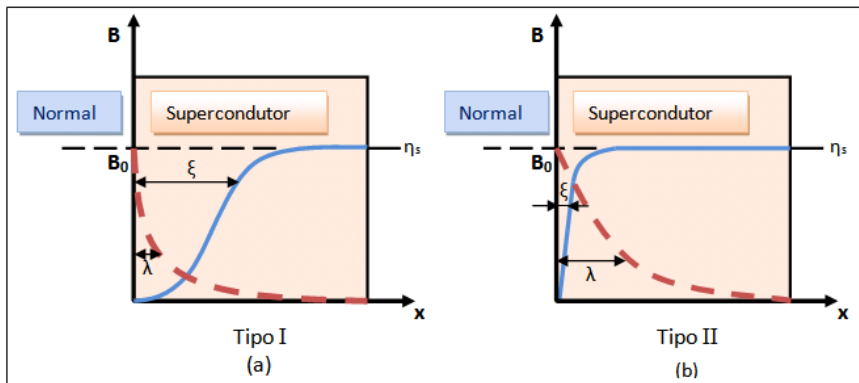


Figura 2.6: Classificação dos supercondutores, em (a) tipo I e (b) tipo II, pelos parâmetros ξ e λ . Adaptada de [11].

η_s – Densidade de superelétrons.

Nos supercondutores do tipo I verifica-se que ξ é maior que λ , acarretando numa pequena penetração de campo magnético na fronteira do material supercondutor, e a densidade de superelétrons terá um comprimento muito maior que λ , até que o valor de η_s seja equalizado [20]. Já para os supercondutores do tipo II a profundidade de penetração é maior que o comprimento de coerência.

2.3.2. A energia livre de superfície e a constante de Ginzburg-Landau

A partir dos dois parâmetros característicos mencionados acima se define a constante de Ginzburg-Landau como:

$$k = \frac{\lambda}{\xi} \quad (2.2)$$

Esse parâmetro surgiu da teoria de Ginzburg-Landau em 1950 [25], como uma nova forma de classificar tecnicamente os dois tipos de supercondutores I e II. Entretanto, para essa classificação é essencial entender que existe uma energia de superfície na fronteira entre a região normal e a região supercondutora, que é diretamente proporcional à área da fronteira entre essas regiões [11], [21]. Quando essa energia de superfície é a mesma nos dois lados da fronteira da região normal e supercondutora, a estabilidade é garantida.

Caso exista um desequilíbrio entre as duas regiões, ocorrerá uma variação na energia de superfície de cada região, e, dependendo dessa variação, a energia pode ser positiva ou negativa. Quando positiva, a penetração de fluxo magnético no interior do material supercondutor é impraticável, do contrário, caso seja negativa, fica propícia a penetração de tubos de fluxo quantizados no seu interior [20].

A penetração de fluxo quantizado permite a coexistência de regiões supercondutoras e normais, logo o material não se encontra no estado Meissner. Nessa condição, o comportamento dos parâmetros característicos λ e ξ é distinto, como mostra a figura 2.7.

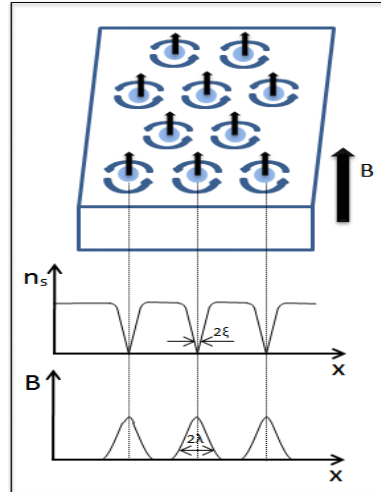


Figura 2.7: Comportamento dos parâmetros λ e ξ no estado misto de um supercondutor do tipo II. Adaptada de [20].

Com esse conceito de energia de superfície bem definido, pode-se classificar os supercondutores do tipo I como os supercondutores com energia de superfície positiva, e os supercondutores do tipo II como os supercondutores com energia de superfície negativa.

A determinação do sinal da energia de superfície é feita comparando k com a constante $1/\sqrt{2}$. Deste modo, se $k < 0,707$, a energia de superfície será positiva e o material supercondutor é classificado como do tipo I. Do contrário, $k > 0,707$, a energia de superfície será negativa e o material supercondutor é considerado como do tipo II. Sendo que nessa condição quando $k = 1$, H_{c1} é menor que H_c e H_{c2} é maior que H_c . A medida que k aumenta, H_{c1} é cada vez menor que H_c e H_{c2} muito maior que H_c [21].

O gráfico 2.8 mostra a magnetização dos supercondutores de acordo com o parâmetro de Ginzburg-Landau, como Abrikosov mostrou:

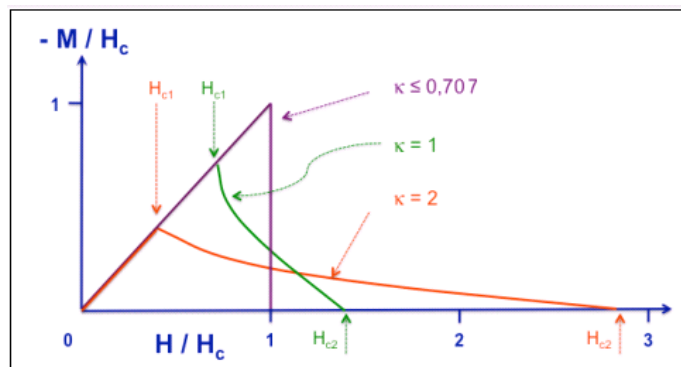


Figura 2.8: Curva normalizada da variação da magnetização em função do campo magnético externo, pelo campo magnético crítico, de forma a classificar os supercondutores em tipo I ($k < 0,707$) e em tipo II ($k > 0,707$) [26].

2.4. LIMITES TEÓRICOS E PRÁTICOS DOS SUPERCONDUTORES

Como apresentado no item 2.1, os materiais supercondutores podem sofrer transição devido a três parâmetros críticos: temperatura, densidade de corrente e campo magnético. Portanto, os materiais supercondutores transitam para o estado normal quando um desses parâmetros atinge um valor crítico, mostrado na figura 2.1, pois são responsáveis pela quebra dos pares de Cooper [15].

A superfície mostrada na figura 2.1, com os limites críticos T_c , J_c e H_c (ou H_{c2} nos supercondutores HTS), geralmente é encontrada na literatura como a superfície que separa a região supercondutora da região normal. Contudo, essa abordagem não engloba todos os aspectos práticos e teóricos que ocorrem nos supercondutores [15].

Em especial, nos materiais supercondutores do tipo II, a superfície pode ser incrementada com um campo irreversível, H_{irr} e uma densidade de corrente limite, J_d como mostra a figura 2.9.

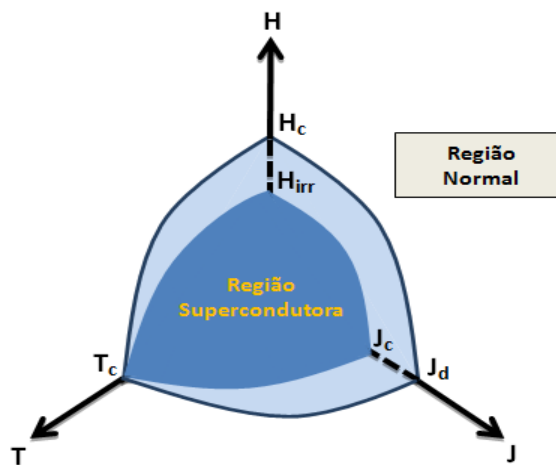


Figura 2.9: Superfície com os limites teóricos e práticos dos supercondutores do tipo II. Adaptada de [15], [21].

Como pode ser observado, o H_{irr} é menor que o campo H_{c2} . Esse é o valor de campo magnético acima do qual o nível de aprisionamento de fluxo (*flux pinning*) torna-se ineficaz e a movimentação das linhas de fluxo causa dissipação [21]. J_d é a densidade de corrente responsável por quebrar os pares de Cooper, de modo a anular o estado supercondutor, denominado corrente de depareamento (do inglês *depairing current*) [27], [28]. Esse valor é maior que J_c , mas é difícil de ser alcançado na prática, pois exigiria um nível de aprisionamento de fluxo altíssimo [29]. A expressão que define o J_d é apresentada em [30].

$$J_d = \frac{\phi_0}{\frac{3}{\sqrt{3}} * \pi * \mu_0 * \lambda(T)^2 * \xi(T)} \quad (2.3)$$

Na prática uma densidade de corrente J_c inferior a J_d provoca dissipação de energia pela movimentação dos fluxóides, separando a rede de Abrikosov. Isto só acontece porque os vórtices estão expostos à força de Lorentz, como mostra a figura 2.10 [30].

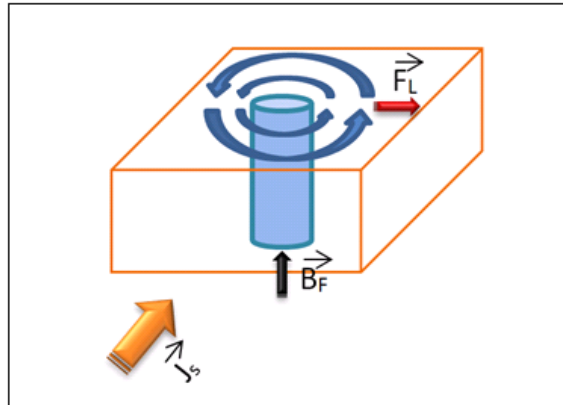


Figura 2.10: Força de Lorentz induzida no vórtice. Adaptada de [15].

A expressão que define essa força é apresentada abaixo:

$$F_L = J \times B \quad (2.4)$$

Assim, se $F_L > F_p$, então os vórtices se deslocam, levando o material ainda no estado supercondutor a ter um comportamento resistivo [21].

2.5. SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA

Ao longo de muitos anos, após a descoberta da supercondutividade em 1911, muitos pesquisadores se empenharam para desenvolver uma teoria que explicasse os supercondutores. Entretanto, somente em 1957 que a teoria microscópica BCS desenvolvida por J. Bardeen, J. R. Schrieffer e L. N. Cooper conseguiu desvendar o fenômeno dos supercondutores metálicos e alguns compostos cerâmicos.

Nessa época, os supercondutores eram refrigerados por hélio líquido que é um fluido refrigerante de baixa temperatura (ponto de liquefação a 4.2 K), sendo nomeados como supercondutores de baixa temperatura crítica (LTS do inglês *Low Temperature Superconductors*).

Esses supercondutores, por sofrerem transição à baixa temperatura exigem equipamentos de refrigeração mais complexos, o que torna o sistema mais dispendioso e praticamente inviabilizava algumas aplicações, tais como as aplicações no setor elétrico.

Com isso, a necessidade de procura por novos materiais supercondutores prosseguiu, e em 1986 foram descobertos os supercondutores cerâmicos de alta temperatura crítica (HTS), com T_c acima de 30 K [26]. A partir desta data, diversos novos compostos cerâmicos foram investigados para elevar a T_c .

Com a descoberta de alguns compostos, como $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO), $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ (BSCCO), entre outros, apresentados na tabela 2.1, com T_c acima de 77K, foi possível obter a refrigeração com nitrogênio líquido. Este fato foi muito relevante no tocante à aplicação dos supercondutores, pois a refrigeração com nitrogênio líquido apresenta custos bem menores e a obtenção do nitrogênio líquido é bem mais simples, viabilizando algumas aplicações tecnológicas.

Tabela 2.1: Materiais supercondutores com T_c acima da temperatura do nitrogênio líquido, 77K. Adaptada de [31].

Composto cerâmico	T_c (K)	Ano
$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	92	1987
$Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_{8+y}$	85	1988
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110	1988
$Tl_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125	1988
$Tl_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ com pressão de 7GPa	131	1993
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$	133	1993
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$ com pressão de 25 GPa	155	1993
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$ com pressão de 30 GPa	164	1994
$(Hg_{0.8}Pb_{0.2})Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$	134	1994
$(Hg_{0.8}Re_{0.2})Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$	134	1995

Além de serem refrigerados por nitrogênio líquido, esses compostos também apresentavam altas correntes críticas. No entanto, as correntes críticas não eram tão altas como se esperava, devido à anisotropia desses materiais.

Ao longo do tempo foram desenvolvidas novas técnicas de desenvolvimento desses materiais, como a técnica de deposição de filmes finos, o que possibilitou a produção dos fios supercondutores de alta temperatura que apresentam correntes críticas bem maiores [32].

Esses fios supercondutores de alta temperatura (HTS) são divididos em duas gerações distintas. Conforme os seus compostos, eles podem ser denominados de primeira geração (1G) ou de segunda geração (2G).

2.5.1. Fios supercondutores de primeira geração (1G)

Os fios supercondutores de primeira geração (1G) são feitos utilizando o composto Bi-Sr-Ca-Cu-O (também conhecido como BSCCO), que apresenta geralmente duas fases de diferentes estequiometrias: Bi-2212 e Bi-2223. Estas são as fases mais utilizadas para a composição de fios HTS, em razão da maior T_c e também por suportar maior campo magnético aplicado [33].

Além de utilizar o BSCCO, os fios supercondutores 1G são revestidos com uma matriz de prata, que representa aproximadamente 70% do seu volume [31]. Essa maior porcentagem de prata existente nesses fios ocasiona um elevado custo dos mesmos, limitando a possibilidade de redução dos gastos de produção em longo prazo. Além disso, esses supercondutores são muito sensíveis ao efeito de campos magnéticos externos (principalmente campo magnético perpendicular à superfície do fio) em alta temperatura. Eles são aplicados em altos campos magnéticos somente a temperaturas mais baixas, especialmente o Bi-2212 que é um dos principais para aplicações em altos campos em hélio líquido [31].

2.5.2. Fios Supercondutores de segunda geração (2G)

Os fios supercondutores de segunda geração (2G), são feitos de uma cerâmica de Re-Ba-Cu-O (Re, representa uma terra rara, que pode ser Ítrio ou Gadolínio), e representaram uma revolução nas aplicações de supercondutores. Visto que a própria composição por terras raras melhora significativamente o desempenho para aplicação com campo magnético especialmente na temperatura do nitrogênio líquido, 77 K.

A técnica de produção desses fios também é mais avançada e eficiente, sendo desenvolvida com multicamadas orientadas e depositadas sobre um substrato metálico. Esta técnica de deposição contribuiu para a fabricação de fios em larga escala e, consequentemente, redução dos custos de produção, no entanto, esses fios ainda são mais caros que os fios 1G [31].

Espera-se que com o desenvolvimento das tecnologias de processamento os fios 2G tornem-se bem mais vantajosos que os 1G (BSCCO) no que diz respeito ao custo/benefício. Outra vantagem é a intensidade de campo irreversível, H_{irr} (T/T_c) em YBCO é muito maior que nos supercondutores BSCCO, em 77K [34], conforme mostra a figura 2.11. Apesar dos supercondutores Bi-2223 apresentarem maior valor de H_{c2} , a aplicação é mesmo restrita pelo H_{irr} [15].

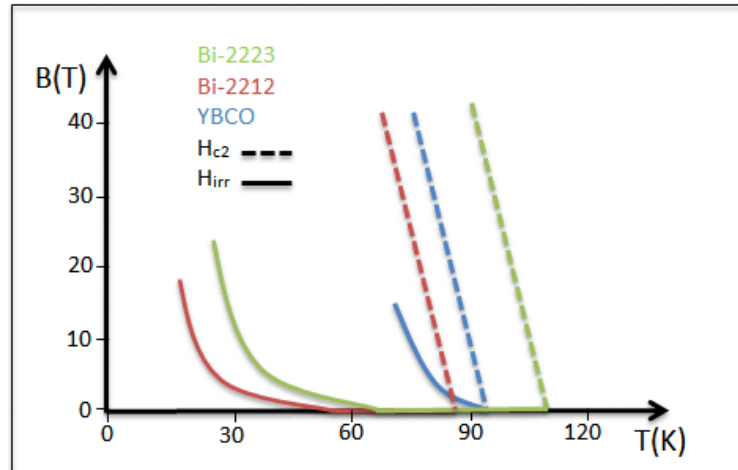


Figura 2.11: Intensidade de campo magnético em função da temperatura com H_{c2} e H_{irr} do BSCCO e do YBCO. Adaptada de [15], [30].

Além dessas vantagens já citadas, os fios 2G também apresentam maior densidade de corrente crítica comparada aos fios 1G.

2.6. DENSIDADE DE CORRENTE CRÍTICA EM SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA

A densidade de corrente crítica J_c é definida como, o maior valor de corrente que um supercondutor HTS pode transportar sem apresentar resistência [28], [35].

Apesar disso, quando J_c é atingida, os fluxóides começam a se mover, como citado no item 2.4. Nesse momento, surge um campo elétrico crítico (adotado aqui como sendo $1\mu\text{V}/\text{cm}$) no qual o material supercondutor transita para o estado normal. A expressão 2.5 relaciona o campo elétrico à densidade de corrente crítica que flui em um supercondutor

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n, \quad (2.5)$$

onde E é o campo elétrico ao longo do supercondutor, J é a densidade de corrente de transporte, E_c o campo elétrico crítico, J_c a densidade de corrente crítica. O índice n é

denominado de índice de transição, pois pode variar para a fase de transição bem como para os vários materiais supercondutores HTS existentes [28], [36].

A homogeneidade ou o valor de n da transição pode estar correlacionado com a distribuição estatística de correntes críticas no condutor e, conseqüentemente, com as características extrínsecas do supercondutor, tais como a geometria do filamento e a existência de fases metalúrgicas distintas [37], [38]. Quanto maior for valor de n em um supercondutor, melhor será a sua homogeneidade. Portanto, apesar do valor de n ser introduzido empiricamente, ele também tem uma interpretação física [37], [38], [39]. A caracterização dos materiais supercondutores baseia-se no levantamento da curva E-J observada na figura 2.12.

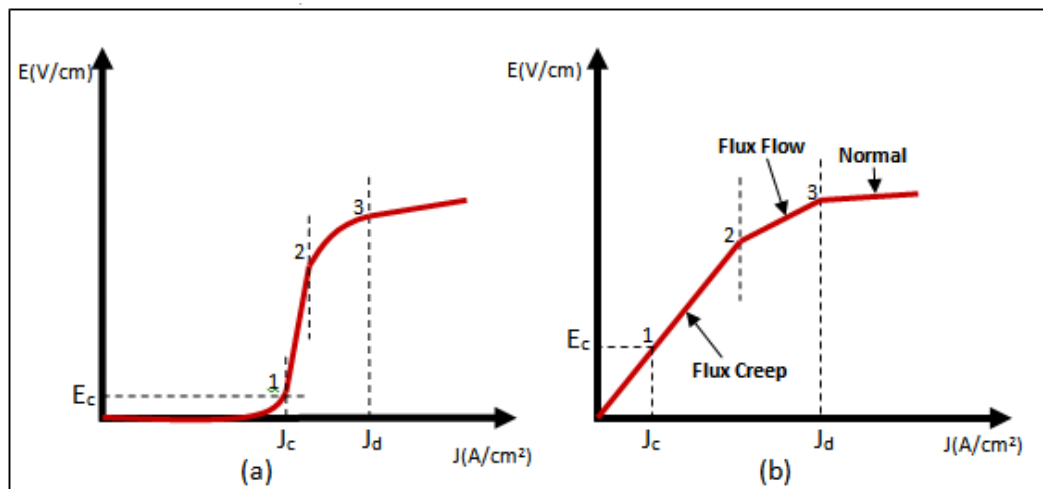


Figura 2.12: (a) Esboço da curva $E - J$ para a determinação das fases de transição supercondutora/normal, (b) curva normalizada em escala logarítmica mostrando os três estágios até atingir a transição completa. Adaptada do [28].

A figura 2.12a e 2.12b mostram o comportamento da curva E-J desde o estado supercondutor até atingir por completo o estado normal, sendo a 2.12b a curva normalizada em escala logarítmica da figura 2.12a. Nas figuras, partindo da origem até o ponto 1, o material encontra-se no estado supercondutor, pois o campo elétrico é abaixo do valor de $1\mu\text{V/cm}$, definido como critério para que os vórtices comecem a se deslocar e a gerar dissipação de energia ou resistência elétrica. Acima desse valor de campo elétrico crítico, o material supercondutor passa por dois estágios de transição antes de atingir por completo o estado normal.

O primeiro estágio, entre os pontos 1 e 2, é denominado de *Flux Creep*. Nessa etapa, o movimento dos vórtices é lento e a força induzida de Lorentz tem uma magnitude próximo ao da força de aprisionamento, ($n \sim 20$ a 40), em 77K [28], [40], [41], [42]. O segundo estágio, entre 2 e 3, é denominado *Flux Flow*, nessa fase os vórtices se movem livremente pelo supercondutor e a força de Lorentz é muito maior que a força de aprisionamento, ($n \sim 2$ a 4) [28], [40], [42]. A partir do ponto 3, o material passa por completo para o estado normal, pois acontece a dissociação dos pares de Cooper. Nesse momento os vórtices se dispersam, destruindo a rede de Abrikosov, ($n=1$).

2.7. BOBINAS SUPERCONDUTORAS

Em decorrência do desenvolvimento das tecnologias, aumentou a necessidade de se obter altos campos magnéticos nas indústrias e na área científica. Para a obtenção de campos magnéticos normalmente são utilizadas bobinas de cobre transportando corrente. Porém, essas bobinas possuem resistência elétrica, gerando assim perdas por efeito Joule. Para densidade de fluxo magnético com magnitude superior a 1-2 T, são utilizadas bobinas feitas de material supercondutor. Como as bobinas supercondutoras não possuem perdas por efeito Joule em CC, e com a grande densidade de corrente desses materiais, é possível produzir uma densidade de fluxo magnético elevado (de até algumas dezenas de teslas) [43].

Existem diferentes tipos de arranjos de bobinas supercondutoras para as mais variadas aplicações. Dentre esses arranjos se destacam os arranjos de bobina solenóide e tipo panqueca. Na figura 2.13, serão apresentados esses arranjos, e em seguida suas vantagens e desvantagens, fazendo uma comparação entre eles.



Figura 2.13: Arranjos de bobinas: (a) bobina solenóide e (b) bobina tipo panqueca [4].

A bobina solenóide apresenta uma densidade de energia armazenada maior, em relação ao tipo panqueca. Porém, apresenta maior dispersão do fluxo magnético [44].

A principal vantagem da bobina tipo panqueca é seu pequeno tamanho sobre as bobinas solenoides. No entanto, a bobina tipo panqueca sofre facilmente com o acúmulo excessivo de energia e tem características dielétricas frágeis [45]. Outra vantagem de um indutor construído por um conjunto de bobinas panquecas em relação à bobina solenóide é a facilidade em reparar o indutor em caso de defeito, pois seria possível substituir apenas a panqueca defeituosa. No caso da bobina solenóide, seria necessário substituir toda a bobina [46].

Porém, os indutores constituídos por conjunto de bobinas tipo panqueca apresentam maiores perdas devido às junções resistivas entre as panquecas. Outra desvantagem associada às bobinas tipo panquecas está relacionada às perdas CA, que advêm da maior densidade de fluxo magnético perpendicular à superfície do fio supercondutor. O campo perpendicular também é responsável por uma redução mais acentuada da corrente crítica na bobina panqueca se comparada com a do tipo solenóide [46].

Os arranjos de bobinas supercondutoras apresentam características que os diferencia, de forma a trazer as vantagens e desvantagens citadas acima. Para determinar o tipo de arranjo a ser executado é preciso analisar onde a bobina será aplicada.

Nesse estudo, o objetivo é a análise das características magnéticas e elétricas de bobinas, levando em consideração diferentes configurações de isolamento. Deste modo, foram construídas bobinas do tipo panqueca (dupla panqueca) pela facilidade de enrolamento.

2.7.1. Aspectos de bobinas supercondutoras

Em bobinas, de modo geral, sempre foi considerado indispensável o isolamento entre as espiras. Porém, recentemente, alguns estudos [4], [5], [6] mostraram que o não isolamento em bobinas supercondutoras pode trazer benefícios para determinadas aplicações, principalmente as que em corrente contínua exigem altos campos magnéticos, pois parte da corrente pode ser desviada pelo contato entre as espiras. Portanto, serão abordados os conceitos de isolamento ou não isolamento entre as espiras de bobinas supercondutoras.

2.7.1.1. Bobinas Supercondutoras com Isolamento

As bobinas supercondutoras apresentam algumas vantagens em relação às bobinas convencionais de cobre. A densidade de corrente é maior, o tamanho é bem reduzido e quase não apresentam perdas. Dessa maneira, podem ser utilizadas em uma diversidade de dispositivos elétricos, em substituição aos fios convencionais, como por exemplo: máquinas elétricas, transformadores, limitadores de corrente e magnetos [3], [7].

Nas máquinas elétricas, os benefícios do uso de bobinas supercondutoras podem ser representados pela diminuição de perdas, bem como a redução do peso e do volume em relação às máquinas convencionais com as mesmas características [35].

As vantagens do uso de bobinas supercondutoras nos transformadores superam as convencionais, nos seguintes quesitos: melhoria no potencial de rendimento, redução do peso e dimensões e capacidade de atuar como limitador de corrente. Algumas desvantagens também podem ser citadas aqui, como a necessidade de sistema criogênico e a redução da impedância interna [23], [7], [47].

Já nos limitadores de curto circuito, quando a corrente é superior à corrente nominal, as bobinas supercondutoras apresentam vantagens relacionadas à redução da corrente de curto-circuito, de modo a proteger os dispositivos da rede elétrica. Esses benefícios dos limitadores supercondutores estão relacionados com: a impedância nula em regime de funcionamento normal, impedância suficientemente elevada em condições de curto circuito, rápida atuação e início da ação preventiva (limitação do primeiro pico). Uma desvantagem pode estar relacionada ao tempo de recuperação, pois dependendo do tipo de limitador esse tempo pode ser um problema [23].

Por fim, a utilização de bobinas supercondutoras em magnetos gera campos magnéticos muito maiores e, são reduzidas em tamanho e volume em relação às convencionais [48].

Apesar das bobinas supercondutoras apresentarem muitos ganhos em comparação às suas contrapartes, devido ao isolamento entre as espiras, elas ainda apresentam alguns pontos deficientes, que serão descritos ao longo desse tópico.

O isolamento entre as espiras de qualquer bobina seja ela supercondutora ou não, normalmente tem a finalidade de separar mecanicamente os condutores e suportar a tensão entre eles [49].

Nas bobinas, de modo geral, os limites de temperatura estão relacionados diretamente à durabilidade do isolamento utilizado. Deste modo, a estabilidade térmica fica comprometida, uma vez que o aquecimento do isolamento pode comprometer diretamente o funcionamento dos equipamentos.

Um ponto crítico específico das bobinas supercondutoras com isolamento é que os fios supercondutores HTS que as constituem, apresentam, devido à sua própria composição, uma espessura reduzida de apenas 400 a 450 μm , sendo que 300 μm do fio é de material isolante que é necessário para evitar curto circuito entre as espiras. No entanto, o material isolante pode afetar a estabilidade térmica e consequentemente reduzir a corrente de operação das bobinas. Fitas de Kapton são frequentemente utilizadas como isolante em fios 2G HTS. No entanto, outros tipos de isolamento também são utilizados, como Formvar² e Apical³, sendo o Kapton mais comumente usado devido às suas excelentes propriedades como isolante elétrico e sua capacidade de operar com alta resistência mecânica e estabilidade em uma vasta gama de temperatura [48].

A técnica de enrolamento da fita Kapton como isolante é helicoidal, resultando em irregularidades na superfície do fio 2G HTS [50]. Em bobinas é desejável que os fios sejam impregnados com epóxi para evitar a movimentação da fita Kapton. Durante esse processo de impregnação epóxi que apresenta um coeficiente de expansão térmica maior que a dos fios 2G HTS, provocará a sua penetração pelos intervalos entre as fitas de Kapton. Durante o processo de arrefecimento, a retração de epóxi pode provocar uma tensão transversal na superfície do metal de HTS que pode delaminar o fio supercondutor, como relatado em [51], [52], resultando na diminuição da corrente crítica e degradação da própria bobina HTS [51].

Uma forma de contornar os transtornos causados pela impregnação epóxi é a utilização de silicone adesivo no envoltório do isolamento Kapton com o fio 2G HTS, que é utilizado por alguns fabricantes, como a SuperPower e a SuNAM, de modo a evitar a redução

² É um isolamento de película sintética contendo acetato de polivinilo e resinas fenólicas.

³ É um filme de poliamida, utilizado em uma vasta gama de temperatura, com elevada resistência dielétrica, flexibilidade, e excelente estabilidade dimensional.

da corrente crítica [53]. O que pode limitar realmente uma bobina 2G HTS com isolamento é a sua dificuldade em dissipar calor, devido ao próprio isolamento ser geralmente um mal condutor de calor, principalmente quando a corrente injetada é acima do valor crítico.

Neste contexto, surgiram as bobinas supercondutoras sem isolamento com o intuito de aumentar a estabilidade térmica, garantindo uma melhora na integridade mecânica e um possível aumento da corrente de operação. Consequentemente, essas bobinas sem revestimento possuem uma autoproteção, pois na ocorrência de ponto quente, *hot spot*, e em estado de sobrecorrente, todo este fluxo de corrente pode ser facilmente desviado através das espiras adjacentes [4]. Isso ocorre porque a área por onde passa a corrente aumenta, porque os fios estão em contato.

2.7.1.2. Bobinas Supercondutoras sem isolamento

A utilização de fios supercondutores em bobinas, inseridos em equipamentos tecnológicos, apresentam-se vantajosos em relação aos materiais condutores, como mencionado no item anterior. Algumas dessas vantagens, que tornam os materiais supercondutores poderosos para essas aplicações são: a condução de corrente elétrica sem perdas em corrente contínua, a alta densidade de corrente e a capacidade de gerar campos magnéticos mais intensos. Essas vantagens permitem um maior rendimento e a redução expressiva do tamanho e peso de equipamentos [44].

Esses benefícios são significativos, podendo ser maiores se considerarmos que os supercondutores têm isolamento Kapton e a sua retirada para algumas aplicações em corrente contínua pode reduzir ainda mais esses equipamentos e aumentar a corrente de operação.

A princípio, essa ideia da retirada do isolamento em determinadas aplicações surgiu com o intuito da aplicação em magnetos supercondutores (HTS) que exigem altos campos magnéticos, como o primeiro estudo apresentado em [4].

No estudo [4], o objetivo foi demonstrar que as bobinas supercondutoras sem isolamento superam as com isolamento, em termos de estabilidade térmica, corrente de operação e integridade mecânica.

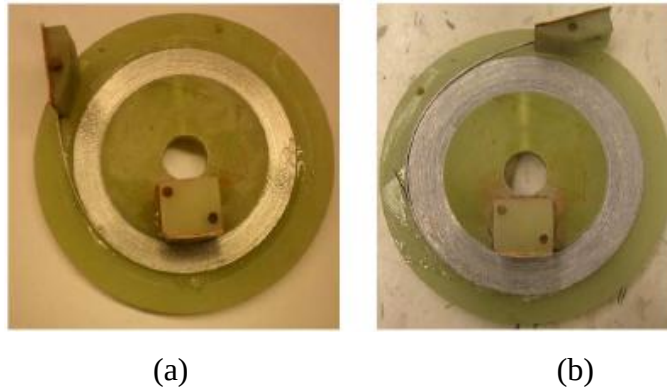


Figura 2.14: Bobina supercondutora de BI2223: (a) com isolamento e (b) sem isolamento [4].

Nesse contexto, em [4], foi construída uma bobina com e outra sem isolamento de Bi2223, de panqueca simples, apresentada na figura 2.14. A bobina de Bi-2223 de panqueca simples foi analisada em carga e descarga em comparação com uma bobina com isolamento de mesmas características. A avaliação de carga e descarga das bobinas foi realizada pelo levantamento do campo magnético em função do tempo no centro da bobina, considerando o aumento da corrente de 20 em 20 A até atingir 120 A, apresentado na figura 2.15, valor de corrente acima do valor de corrente crítica das bobinas, que foram de 76 e 85 A na bobina sem e com isolamento, respectivamente [4]. Curiosamente a bobina com isolamento apresenta maior valor de corrente crítica, pois os lotes de fios utilizados no enrolamento dessas bobinas são diferentes, sendo o lote de fio com Kapton com maior corrente crítica.

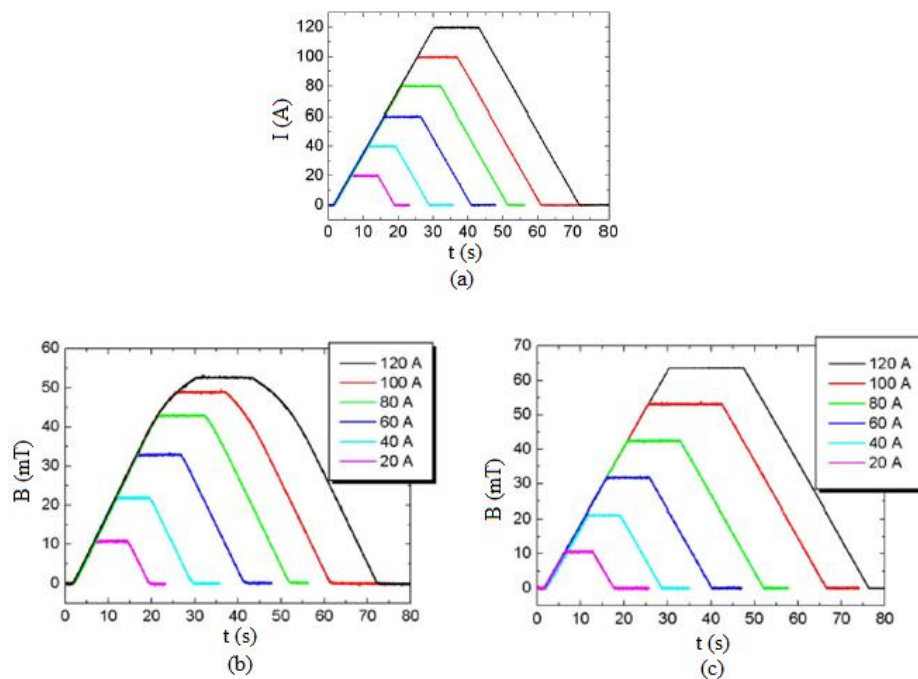


Figura 2.15: Corrente e campo magnético em função do tempo nas bobinas: (a) corrente nas bobinas, (b) campo magnético na bobina sem isolamento e (c) campo magnético na bobina com isolamento [4].

Os resultados obtidos nessa análise mostraram que o campo magnético aumenta linearmente até 60 A, mas acima deste, para os valores de 80, 100 e 120 A, o campo magnético na bobina sem isolamento praticamente satura, enquanto que na bobina com isolamento o campo magnético continua na mesma crescente. Esses resultados permitiram aos autores concluir que a corrente de operação é maior em bobinas sem isolamento do que nas com isolamento, pois devido ao contato entre as espiras, parte da corrente é desviada. Neste caso, o desvio foi de 20 %, considerando que na bobina sem isolamento, em 120 A, o campo magnético foi de 53 mT e na bobina com isolamento foi de 66 mT.

De modo a avaliar a estabilidade térmica, no mesmo estudo, também foi medida a tensão nos terminais das bobinas, como mostra a figura 2.16:

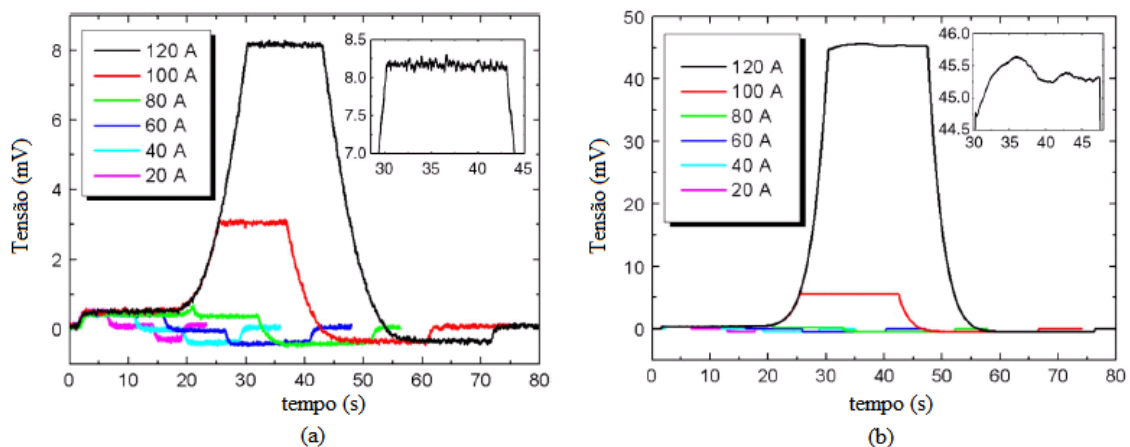


Figura 2.16: Tensão nos terminais das bobinas: (a) bobina sem isolamento e (b) bobina com isolamento. O gráfico em vista ampliada é no patamar de 120 A [4].

Esses resultados mostram que a bobina sem isolamento é mais estável que a bobina com isolamento. Pois, usando como base a vista ampliada, foi apontada a estabilidade da tensão na bobina sem isolamento e a variação da resistência na bobina com isolamento, que implica no sobreaquecimento e recuperação ocorrendo no local do enrolamento [4].

Na literatura encontramos as seguintes referências: [5], [6], [54], [55]. Esses estudos têm sido realizados de forma a contemplar as conclusões obtidas em [4] e também expandir esse conceito para a utilização em outros equipamentos.

Em [54] com o objetivo de solidificar as conclusões obtidas em [4], foram construídas e investigadas 8 bobinas HTS em três opções de combinações: 1) panqueca simples e panqueca dupla; 2) com e sem isolamento; 3) BSCCO com e sem condutor revestido.

Primeiramente foi realizada a análise de carga e descarga das bobinas de panqueca dupla BSCCO com e sem isolamento, e os resultados de campo magnético central e da tensão nos terminais são exibidos nas figuras 2.17 e 2.18:

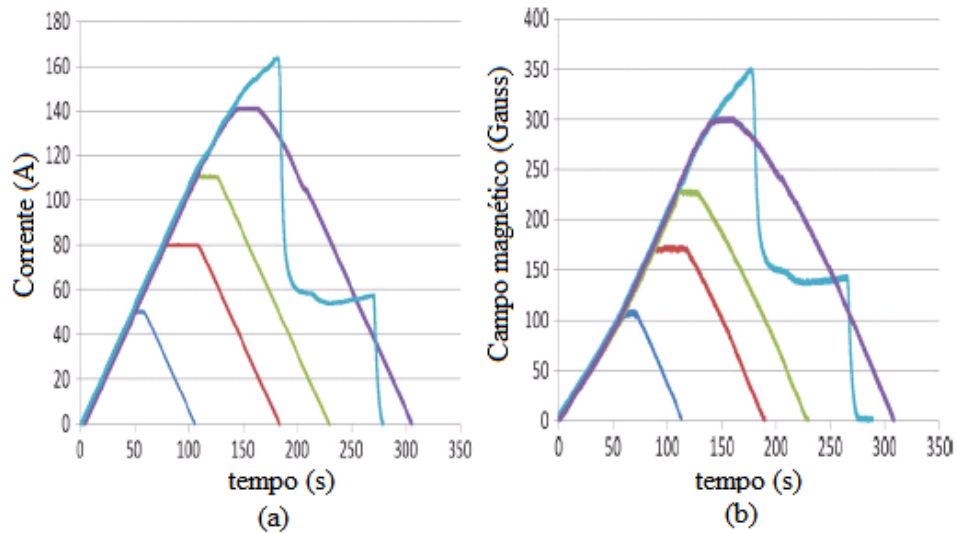


Figura 2.17: Resultados da bobina de panqueca dupla de BSCCO com isolamento: (a) Corrente no tempo e (b) campo magnético no tempo [54].

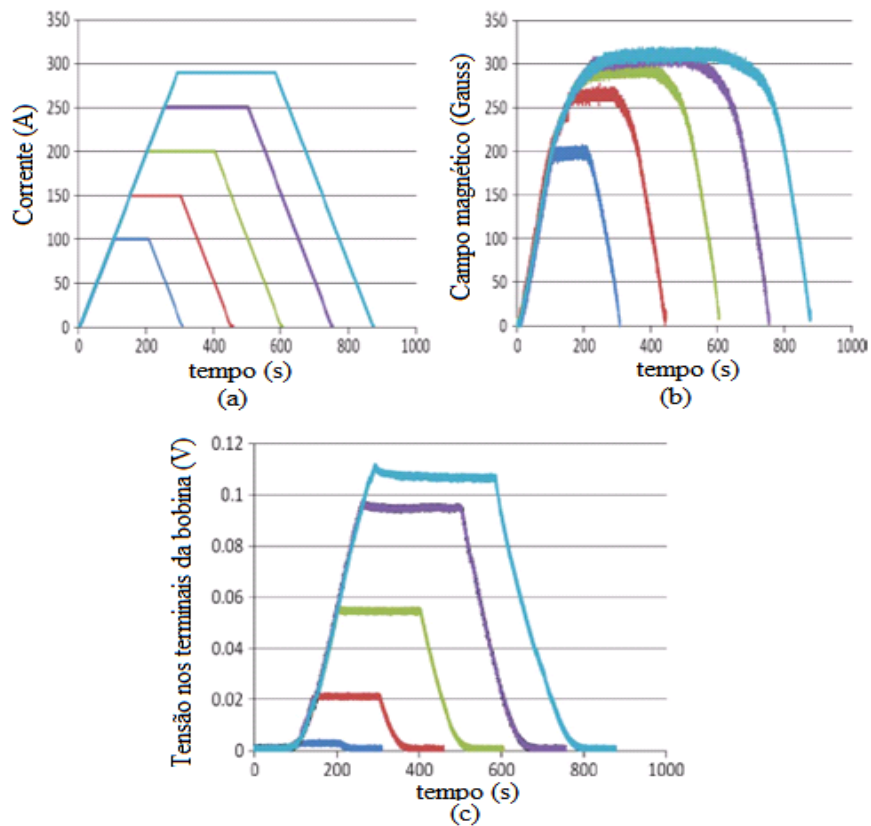


Figura 2.18: Resultados da bobina de panqueca dupla BSCCO sem isolamento: (a) Corrente no tempo, (b) campo magnético no tempo e (c) tensão no tempo [54].

A figura 2.17 mostra que na bobina com isolamento o campo magnético aumenta linearmente até que ela seja danificada, em 163 A, corrente acima do valor crítico de 93 A [48].

A partir do comportamento distinto apresentado na figura 2.18, para valores acima do valor crítico de 90 A, esse estudo conclui que o campo magnético satura e a tensão é estável na bobina sem isolamento.

Em seguida, foi realizada a investigação da bobina de panqueca dupla com revestimento e com e sem isolamento. Os resultados são ilustrados nas figuras 2.19 e 2.20.

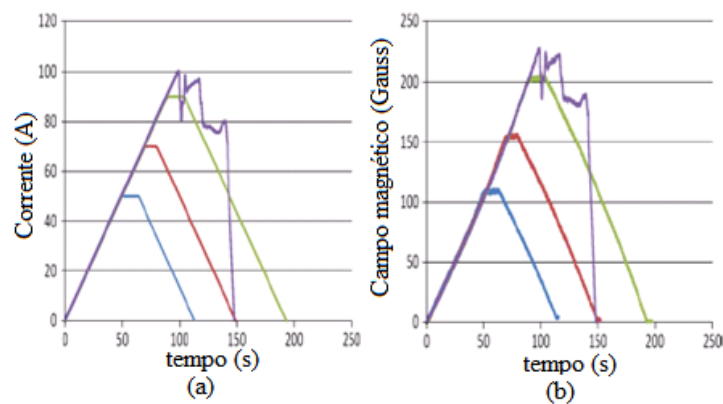


Figura 2.19: Resultados da bobina de panqueca dupla com revestimento e com isolamento: (a) Corrente no tempo e (b) campo magnético no tempo [54].

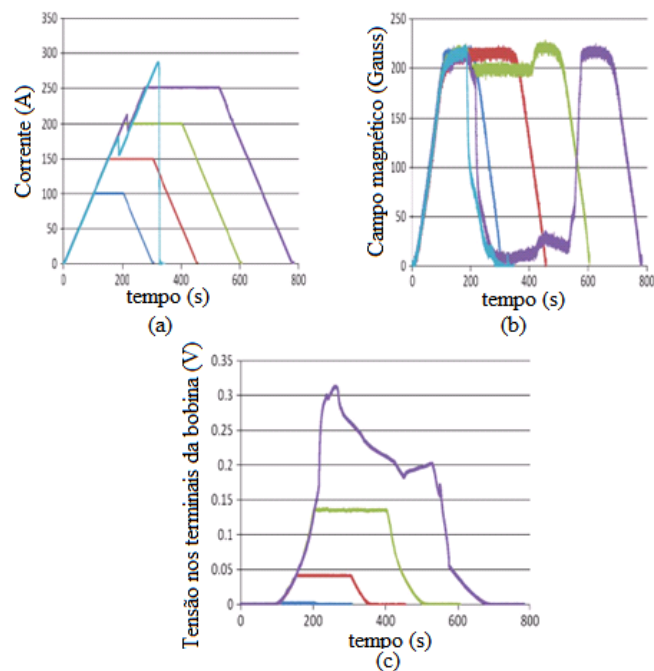


Figura 2.20: Resultados da bobina de panqueca dupla com revestimento e sem isolamento: (a) Corrente no tempo, (b) campo magnético no tempo e (c) tensão no tempo [54].

Na análise de carga e descarga realizada em [54], mostrada na figura 2.19, a bobina de panqueca dupla com revestimento e com isolamento foi danificada em 90 A, apenas 1 A acima do valor crítico de 89 A.

Já as análises feitas da figura 2.20 indicam que para corrente acima de 150 A, o campo magnético satura, no entanto, nesse patamar de saturação o campo gera a chamada “cratera”, pois o campo diminui, permanecendo por certo tempo em um patamar menor e aumentando novamente para o patamar de saturação, isso acontece até atingir um valor de corrente em que a bobina é danificada [54].

As outras análises, das bobinas de panqueca simples com e sem revestimento e isolamento não são apresentados aqui, por apresentarem resultados similares aos obtidos nas bobinas de panqueca dupla BSCCO com e sem isolamento e com e sem revestimento.

Esses resultados permitiram aos autores concluir que as bobinas sem isolamento são mais estáveis e a densidade de corrente é maior em relação às bobinas com isolamento, pois em todos os testes, apenas as bobinas com isolamento foram danificadas exceto a bobina de panqueca dupla com revestimento e sem isolamento, porém, foi danificada com uma corrente bem maior.

Outra constatação dos autores é que a bobina de panqueca dupla com revestimento e sem isolamento forma a chamada “cratera” devido à menor quantidade de estabilizador em relação à bobina de panqueca dupla BSCCO sem isolamento [54].

Com esses e outros estudos como [6], [55], é notável a importância do não isolamento de bobinas em relação às com isolamento por apresentarem aspectos singulares que podem ser aproveitados. Portanto, já se estuda a aplicação desses em outros equipamentos, como em [5]. No estudo, o intuito é avaliar bobinas HTS tipo *racetrack* com condutor revestido, para aplicações em máquinas elétricas.

Nesse âmbito, foram construídas duas bobinas, uma com isolamento e outra sem isolamento, para análise de seus comportamentos em carga e descarga e sobrecorrente [5].

Para a realização desse estudo foram feitos testes de carga e descarga, aumentando a corrente de 20 em 20A até 160A, com uma taxa de 1A/s e um patamar de 300 ms, como a figura 2.21a. O campo magnético central e a tensão foram medidas em relação ao tempo, nas bobinas com e sem isolamento, como apresentado nas figuras 2.21 e 2.22.

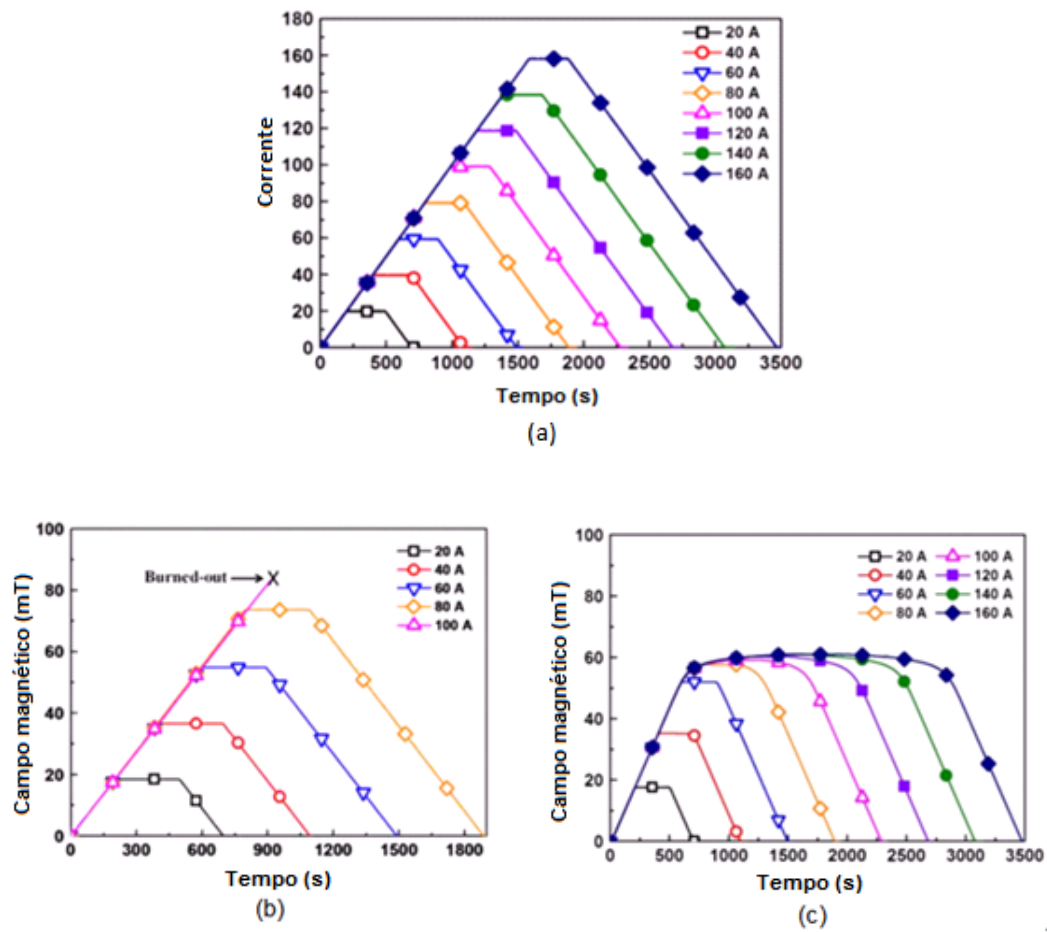


Figura 2.21:(a) Rampa de corrente, (b) e (c) campo axial central em função do tempo na bobina com isolamento e sem isolamento, respectivamente [5].

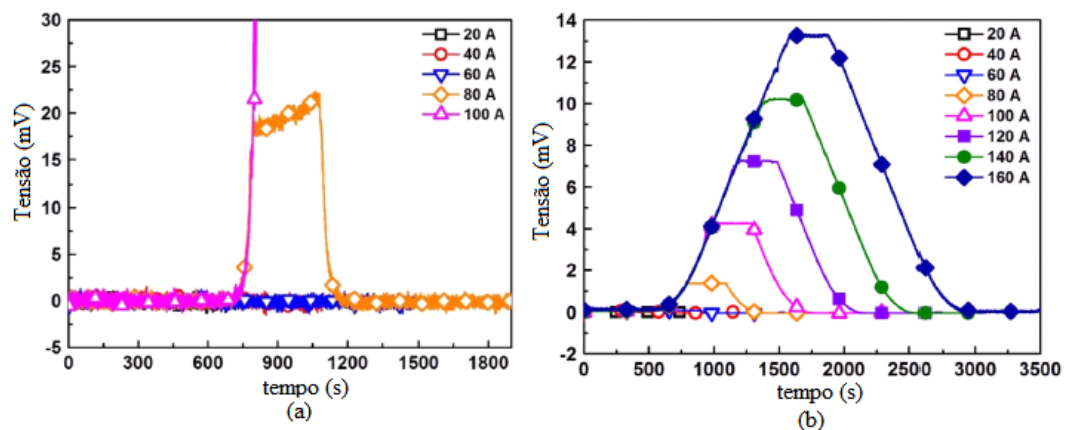


Figura 2.22: Tensão nos terminais das bobinas: (a) com isolamento e (b) sem isolamento [5].

Segundo os autores a bobina queima quando a corrente aumenta para um valor um pouco acima da corrente crítica ($I_c=71$). Isto porque a corrente só tem um caminho a percorrer, que é o caminho ao longo das espiras, devido ao isolamento, gerando pontos quentes, que destroem a bobina [5].

Na figura 2.21c, devido ao contato entre as espiras o comportamento é diferente, pois em bobinas sem isolamento a corrente pode atingir valores maiores que a corrente crítica ($I_c=62A$) sem danificar a bobina. Desta maneira, a corrente que excede a corrente crítica é desviada no caminho radial sem danificar a bobina e o campo no supercondutor estabiliza [5].

A figura 2.22 exhibe as curvas de tensão, sendo mostrado que a bobina com isolamento sofre com o acúmulo de energia, portanto a tensão aumenta significativamente até a bobina ser destruída, enquanto que na bobina sem isolamento a tensão manteve-se estável para valores de corrente maiores que seu valor crítico [5].

Esses resultados permitiram aos autores a análise de que as bobinas sem isolamento podem proporcionar bobinas tipo *racetrack* mais compactas / autoprotegidas, com integridade mecânica reforçada, bem como melhor estabilidade térmica e elétrica para máquinas rotativas HTS [5].

Todos os resultados obtidos nos estudos apresentados comprovam que existe um caminho paralelo para a corrente. Este se torna importante para valores acima de I_c , pois, nestas, o excedente flui pelo caminho radial, não contribuindo para o campo, que é estabilizado. Portanto, as bobinas sem isolamento apresentam vantagens em termos de estabilidade térmica, corrente de operação e integridade mecânica.

É importante notar que há inconsistência entre os resultados de [4], [5], [54]. A “cratera” só foi observada durante um ensaio em [54], assim como o comportamento de aumento reduzido do campo em [4].

Há também na figura 2.16 um comportamento peculiar onde a tensão apresenta um pequeno degrau no início do ensaio e cai até ficar negativa ao final. Esse não corresponde a nenhum ensaio realizado e indica um problema no sistema de aquisição.

Já na figura 2.20a as curvas de correntes apresentam um dente na subida, próximo aos 170A, podendo remeter este a uma complicação da fonte em sustentar uma carga muito indutiva. Os pontos dos inícios dos “dentes” coincidem com os das “crateras”.

Apesar da evidência de muitos ganhos das bobinas sem isolamento, ainda existem alguns desafios técnicos a serem resolvidos para torná-las aplicáveis em equipamentos elétricos. Um deles é o atraso no carregamento e descarregamento, mas que já está sendo solucionado com o enrolamento parcialmente isolado, como descrito em, [54], [56].

Além desse, outros desafios, como as perdas em corrente alternada e o comportamento do *quench* sob uma condição de sobrecorrente, ainda não foram investigados e alguns pontos carecem de um estudo mais aprofundado, de forma a contemplar as conclusões apresentadas nos trabalhos apresentados e melhor compreender esse assunto.

3. CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES 2G HTS

Neste capítulo, será descrito todo o processo de caracterização de fios supercondutores 2G, com e sem campo magnético externo, que foram realizados nos laboratórios da UFF, do CEPEL e da UFRJ. Serão apresentados os aparatos experimentais utilizados nos ensaios e os resultados obtidos.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES 2G HTS (SEM CAMPO MAGNÉTICO INCIDENTE)

Como mencionado anteriormente, os materiais supercondutores não obedecem à lei de Ohm, ou seja, quando recebem um impulso de corrente, a queda de tensão não responde linearmente como o esperado em materiais metálicos. Supercondutores apresentam resistividade nula ou desprezível em corrente abaixo de I_c . Acima de I_c a curva $E \times J$ é expressa pela equação 2.5.

Em uma pequena amostra, a caracterização é atribuída pelo campo elétrico, que é à queda de tensão dividida pela distância entre os contatos. O critério para a corrente crítica adotada nesse estudo foi a que provoca o campo elétrico de $1 \mu V/cm$. Baseado nesse critério a caracterização das amostras de fios supercondutores são obtidos pelo levantamento da curva $V \times I$.

Para esse levantamento são necessários alguns aparatos experimentais e alguns procedimentos são seguidos.

3.1.1. Aparatos experimentais

Aqui, são descritos os componentes que compõem os aparatos experimentais usados para a realização dos ensaios.

3.1.1.1. Fonte de corrente contínua estabilizada

A fonte de corrente contínua estabilizada é um modelo Argantix KDC 500 A/30V mostrada na figura 3.1.



Figura 3.1: Fonte de corrente contínua estabilizada, modelo Argantix KDC 500 A/30V.

Essa fonte é programável e é utilizada especificamente para testes em sistemas de laboratório. A precisão é de $\pm (0,1\% \text{ da leitura} + 0,2\% \text{ do fundo de escala})$, a resolução de $\pm 0,025$ do fundo de escala e a estabilidade de $\pm 0,05$ do ponto de ajuste após 8 horas. Ela exige saída única, tensão contínua variável e corrente com pouca oscilação. Também apresenta boas características de regulação e controle em medições sofisticadas.

3.1.1.2. Nanovoltímetro

O nanovoltímetro é um modelo da Keithley 2182A, com 7 ½ dígitos mostrados na figura 3.2.



Figura 3.2: Nanovoltímetro da Keithley 2182A.

O nanovoltímetro foi projetado para a realização de medições estáveis, com taxa de aquisição de 16,67 ms, ruído em torno de 70 nV e resolução de 1 nV para caracterização de materiais com baixa resistência, propício para medição de tensão em supercondutores, onde a resistividade é quase nula. Ele também permite controle dos instrumentos via GPIB e a comunicação com o computador.

3.1.1.3. Porta amostra

A figura 3.3 mostra o porta amostra utilizado para realizar as caracterizações.

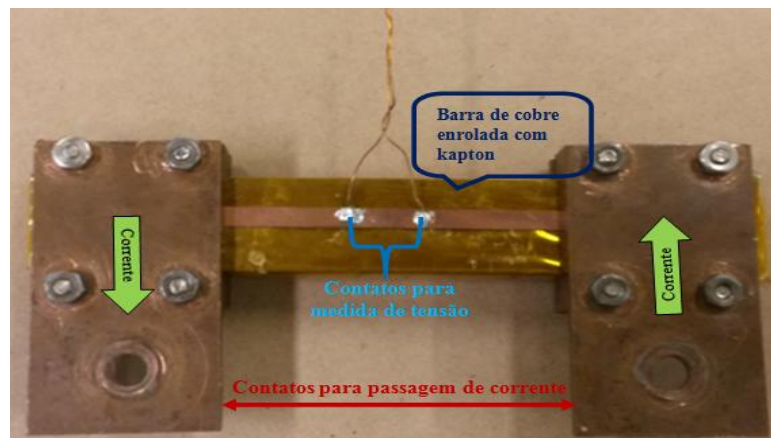


Figura 3.3: Porta amostra usado nas caracterizações.

O porta amostra é composto por uma barra de cobre de 10 cm de comprimento, 2 cm de largura e 1 cm de espessura enrolada com Kapton. A barra de cobre funciona como uma âncora térmica e o Kapton como um isolante elétrico.

O encaixe do fio no porta amostra é feito usando terminais de cobre nas pontas do suporte, que com o auxílio de folhas de índio exercem uma pressão no fio para garantir o contato de corrente. Neles também são presos os cabos de corrente por meio de parafusos e porcas.

Os contatos de tensão são soldados no próprio fio com solda índio estanho, devido ao seu baixo ponto de fusão entre 135°C e 140°C, para evitar danos ao fio pela exposição por longo tempo a uma temperatura superior a 250°C, como recomendado pelo fabricante SuperPower [57]. Esses contatos foram feitos com fios finos de cobre para ocasionar a mínima resistência de contato possível, de forma a não comprometer as medições. Também os fios foram trançados até atingir as pontas de conexão dos instrumentos de medição, com o intuito de evitar ruídos e interferências no entorno e reduzir a indutância desses fios condutores.

3.1.2. Procedimentos de Ensaios

Para a caracterização dos fios 2G geralmente é adotado o Método de Medição a Quatro Pontas, visto na figura 3.3, buscando evitar ao máximo a resistência de contato que de alguma forma pode interferir nos dados experimentais.

Nesse método, a corrente é imposta nos terminais de cobre e a queda de tensão é medida entre os dois contatos de tensão. A grande vantagem deste método é a resistência de contato ser relativamente baixa [58].

Considerando esse método, o procedimento para a realização dos ensaios de caracterização pode ser descrito a seguir.

Inicialmente, corta-se a amostra de fio supercondutor enrolado no carretel. Depois disso, são soldados os fios finos de contato de tensão com solda índio estanho. A seguir, a amostra é posicionada sobre o suporte e prensada nos extremos com dois terminais de cobre. Para melhorar o contato foi usada folha de índio entre o fio e os terminais. Nos terminais também são presos os cabos da fonte de corrente e os fios finos de contato de tensão são ligados ao nanovoltímetro.

Com todos os contatos e as conexões feitas, a amostra é submergida em nitrogênio líquido cuja temperatura de ebulição à pressão atmosférica é 77 K, em um reservatório com isolamento térmico. O ensaio para caracterização de fios supercondutores é feita mediante um programa desenvolvido em Excel, anexo A.

No programa, de acordo com o Método de Medição a Quatro Pontas foram definidos como dados de entrada, a distância, em cm, entre os pontos de medição de tensão, e o valor de campo crítico do fio, em $\mu\text{V}/\text{cm}$. A corrente foi injetada em forma de onda pulsada, figura 3.4, onde o seu valor nominal é aumentando regularmente, até que seja ultrapassado o valor de tensão crítica da amostra de fio ensaiado.

Em cada ensaio, foram definidos dois tempos. Um deles, de 500 ms, que é o tempo em que a fonte está programada para a injeção de corrente e o outro, de 10s, que é o tempo entre cada pulso de corrente. A finalidade do uso de onda pulsada é não submeter os fios a correntes acima do valor crítico, por um longo período, pois os intervalos entre os pulsos garantem a recuperação do fio.

Através do GPIB, ocorre a comunicação do computador com os instrumentos de medição, de modo a controlar a fonte, para gerar pulso de corrente na amostra e medir a queda de tensão pelo nanovoltímetro.

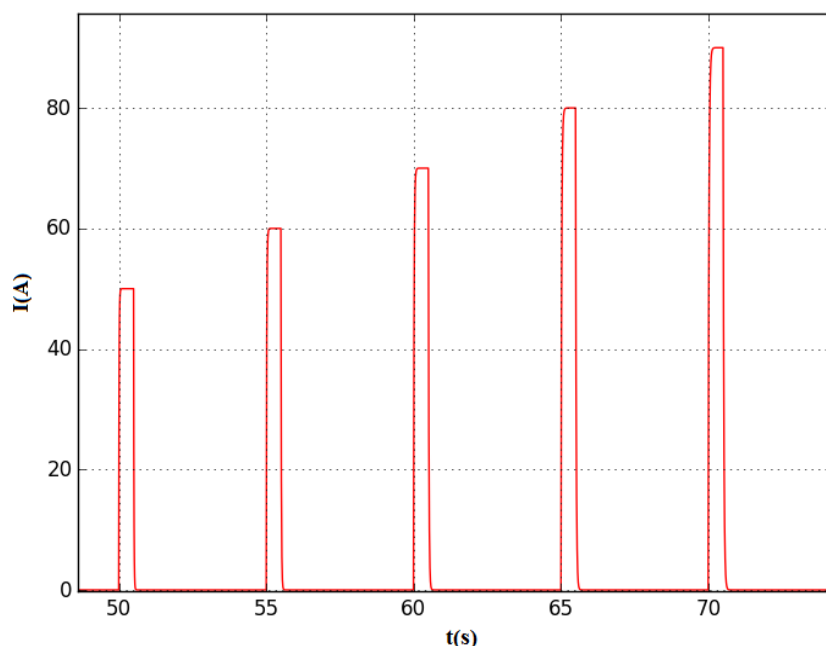


Figura 3.4: Pulsos de corrente com 500 ms e intervalos de 5s com a fonte desligada.

Para cada pulso novo a corrente é aumentada de 10 em 10A até atingir o limite crítico de tensão da amostra. Para amostrar mais pontos na curva $V \times I$, quando valores próximos da corrente crítica da amostra eram medidos, o incremento na corrente passou para 1 em 1A entre pulsos.

3.1.3. Especificações dos Fios e resultados obtidos

Os ensaios realizados têm como objetivo a caracterização de fios 2G HTS de três fabricantes diferentes, SuperPower, SuperOx e SuNAM, com as suas composições camada por camada e suas dimensões mostradas nas figuras 3.5, 3.6, 3.7, respectivamente, de modo a auxiliar na definição de qual fio deve ser utilizado nas bobinas.

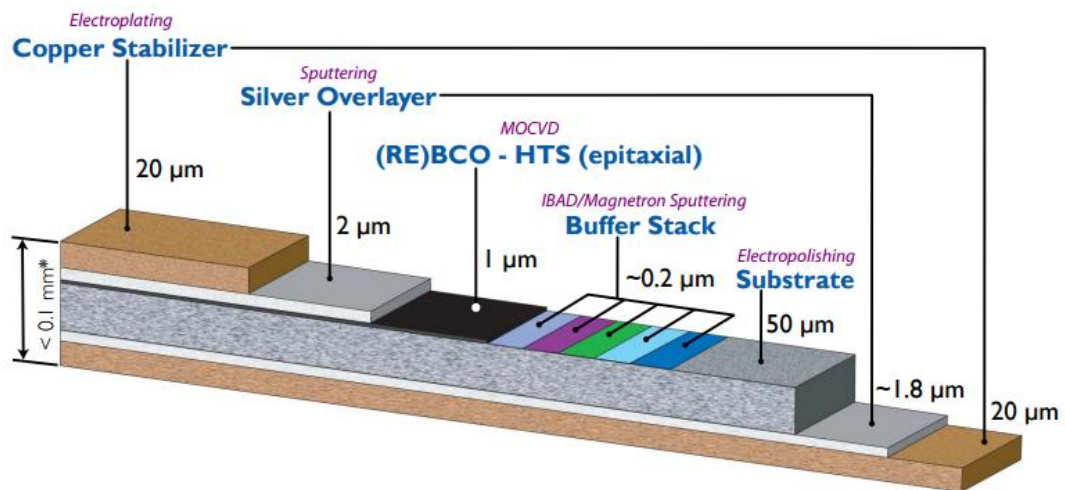


Figura 3.5: Fio supercondutor da SuperPower, camada por camada com as dimensões especificadas [59].

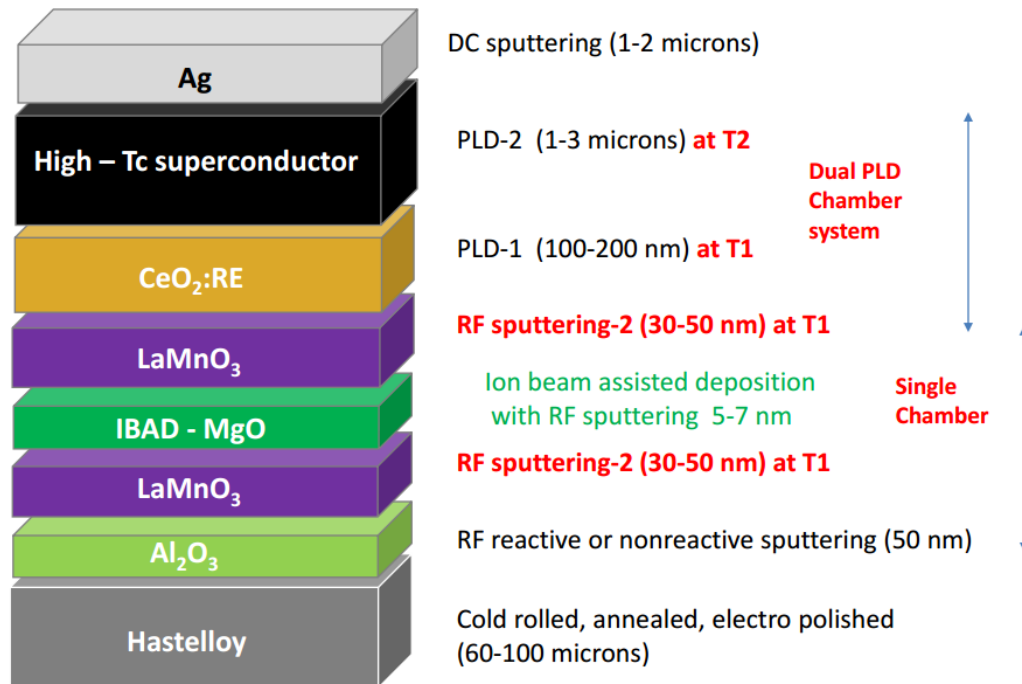


Figura 3.6: Fio supercondutor da SuperOx, camada por camada com as dimensões especificadas [60].

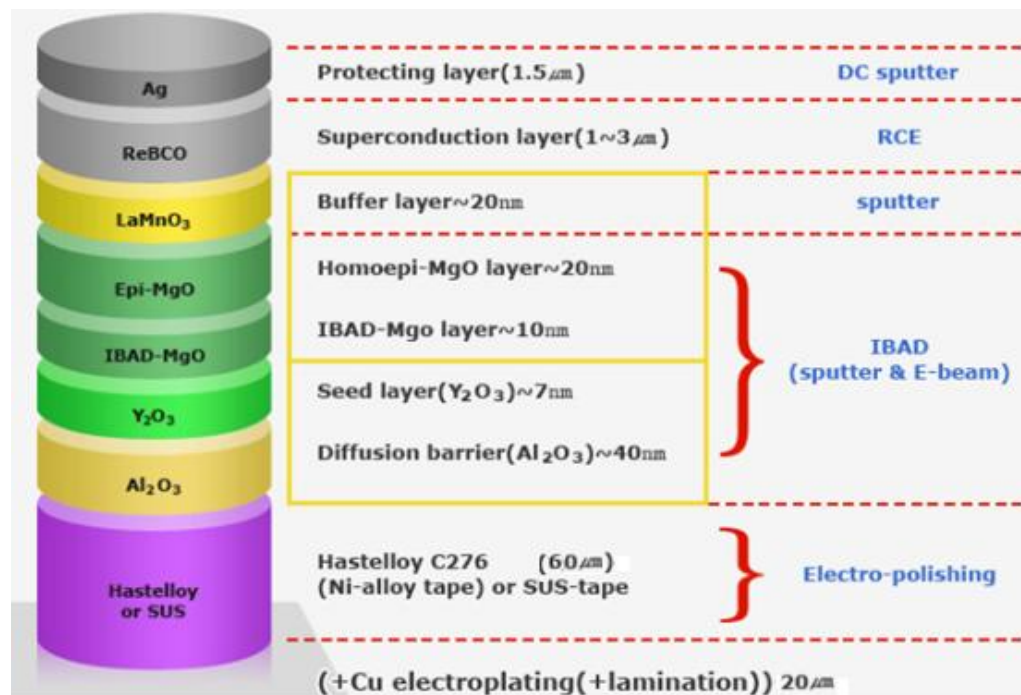


Figura 3.7: Fio supercondutor da SuNAM, camada por camada com as dimensões especificadas [61].

Além das dimensões, outros parâmetros dos fios supercondutores caracterizados, são especificados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificações de fios supercondutoras.

Fabricante	SuperPower	SuperOx	SuNAM	
Modelo	SCS4050	127A12E-R	SCNk04150-1412223-01	SCN040200-140613-03
Categoria	2G HTS	2G HTS	2G HTS	2G HTS
Ano de fabricação	2014	2014	2014	2014
Comprimento total no carretel	10 m	10 m	20 m	20 m
Largura	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Substrato	Hastelloy	Hastelloy	Hastelloy	Hastelloy
Espessura do Substrato	50 μm	60 μm	60 μm	60 μm
Espessura do cobre	20 μm	20 μm	20 μm	20 μm
Espessura total	200 μm	200 μm	258 μm	147 μm
I_c mínima em 77K, autocampo	120 A	140 A	220 A	209 A

Na tabela 3.1 é especificado o ano de fabricação dos fios, pois é relevante que todos os fios analisados sejam do mesmo ano, dado que a cada ano os fabricantes buscam melhorar o processo de fabricação e consequentemente as propriedades de seus fios.

Atualmente existem diferentes fabricantes de fios 2G HTS como os mencionados na tabela 3.1, e cada um apresenta um método diferente de fabricação dos mesmos. Devido a esses diferentes métodos de fabricação, os parâmetros que regem a supercondutividade do material, como o campo magnético crítico, a densidade de corrente crítica e a temperatura crítica podem ser afetados. Assim, a caracterização desses fios é importante para uma investigação mais profunda das propriedades das amostras utilizadas sob condições similares de ensaio e qual fio possui melhores parâmetros para a aplicação desejada.

As caracterizações foram feitas com três amostras de cada fabricante e cada uma com comprimento de 10 cm. Os resultados das curvas $V \times I$ com I_c médias são ilustradas na figura 3.8.

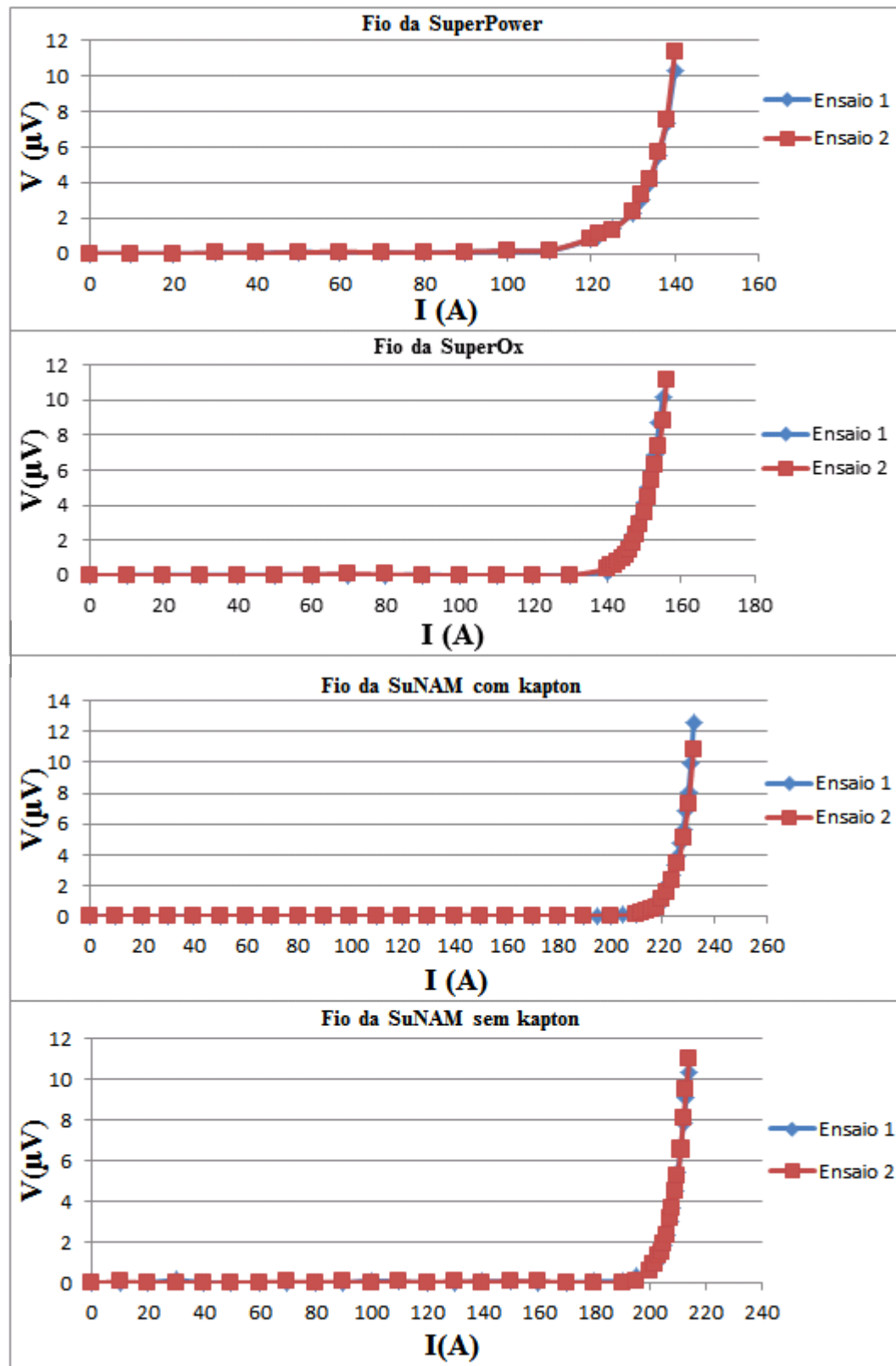


Figura 3.8: Curva $V \times I$ de caracterização de fios supercondutores: fio da SuperPower, fio da SuperOx, fio da SuNam isolado com Kapton e fio da SuNAM sem Kapton.

Como a distância entre os contatos de tensão é de 1 cm, então, as correntes críticas médias de cada fio pelo critério de $1\mu\text{V}/\text{cm}$, para as amostras de fios da SuperPower, Superox, SuNAM com Kapton e sem Kapton são de 122 A, 144 A, 220 A e 203 A, com desvio padrão de 2.51, 3.6, 1.53 e 4.9, respectivamente.

Os fios da SuNAM apresentam maior valor de corrente crítica. Mas, além desse parâmetro técnico outro ponto é crucial para a escolha de um fio 2G HTS. Trata-se do fator custo/benefício. Considerando-se apenas o autocampo, o fio da SuNAM possui maior valor de I_c e melhor custo que os fios das outras empresas que foram analisados neste trabalho.

No entanto, para as aplicações em bobinas o decaimento da corrente com um campo externo é um fator crítico. Desta forma, pensando em uma aplicação em que as bobinas supercondutoras são utilizadas em equipamentos sujeitos ao campo magnético, além da corrente crítica e do custo exige uma avaliação do campo magnético incidente no fio, de forma a determinar qual fio reuniria melhores condições para uma aplicação. Com vista uma aplicação para as bobinas futuramente, também foi realizada a caracterização dos fios com campo magnético externo.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES 2G HTS (COM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO)

Quando um fio 2G HTS é submetido a um campo magnético, sua corrente crítica é reduzida. Essa redução depende do ângulo de incidência e da orientação do campo na superfície do fio, figura 3.9, pois devido à extrema anisotropia desse material, a corrente crítica é maior quando o campo magnético é aplicado perpendicularmente à sua face e mais baixa quando o campo é paralelo à face, mas perpendicular à orientação predominante do fluxo de corrente.

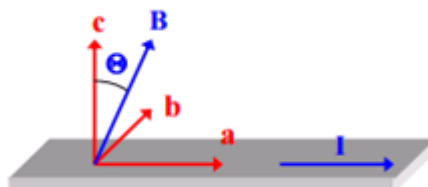


Figura 3.9: Direção do fluxo de corrente em um supercondutor 2G HTS e suas respectivas direções de campo magnético incidente [62], [63] .

A figura 3.9 mostra a decomposição do campo magnético em três direções distintas: a b, e c. A direção c é normal à superfície do fio e a direção a e b são paralelas à superfície do fio.

O efeito da incidência do campo na direção c é superior à incidência do campo nas direções a e b. Portanto, para a caracterização de fios supercondutores com campo magnético é de extrema relevância avaliar a incidência desses campos nas direções b e c, ambas perpendiculares à direção da corrente.

Além da dependência da corrente crítica com a incidência do campo magnético, é bom ressaltar que a corrente crítica também depende da temperatura. Na verdade, existe uma interdependência da corrente crítica com a incidência de campo e a temperatura, como pode ser analisado na figura 3.10.

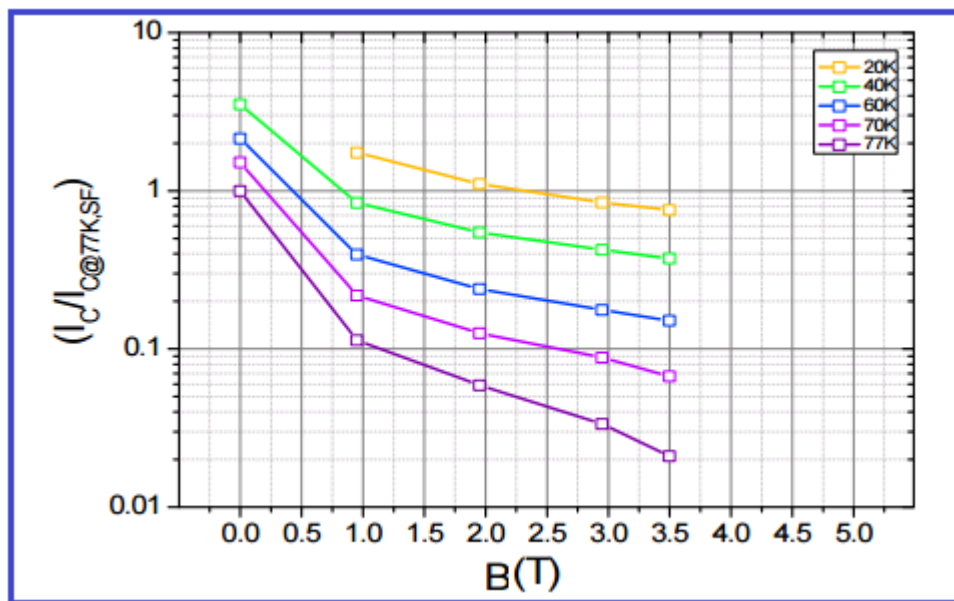


Figura 3.10: Declínio da corrente crítica com a incidência de campo magnético perpendicular a superfície do fio em temperaturas distintas [Cortesia da SuNam 2015].

Como verificado, a redução da corrente crítica, pela incidência de campo, pode ser contrabalançada com a redução da temperatura. No entanto, para efeito de aplicações dos fios em equipamentos tecnológicos, a redução da temperatura aumentaria os custos de refrigeração [63].

Contudo, nesse trabalho, consideramos a temperatura fixa em 77 K, temperatura de ebulição do nitrogênio líquido a pressão de 1 bar. Apenas foi avaliado o efeito da incidência de campo magnético na corrente crítica dos fios.

3.2.1. Equipamentos utilizados para medir I_c com campo magnético externo

Além dos aparatos experimentais utilizado no item 3.1.1, para a caracterização com campo magnético incidente são necessários outros aparatos, descritos abaixo:

3.2.1.1. Fonte de corrente contínua e o Eletromagneto

A fonte de corrente contínua para eletromagneto é um modelo 643 da LakeShore mostrada na figura 3.11.



Figura 3.11: Fonte de corrente contínua da LakeShore, modelo 643.

Esse é um modelo de fonte de corrente bipolar que fornece a saída em 4 quadrantes, eliminando a necessidade de comutação externa ou intervenção do operador para inverter a polaridade de corrente. Essa fonte é capaz de fornecer ± 70 A / ± 35 V a uma carga nominal de $0,5 \Omega$, $0,5$ H, e a saída pode ser modulada a partir de uma fonte externa para frequências até $0,17$ Hz em ± 70 A.

O eletromagneto é um modelo HV-4H/HSV-4H1, da Walker Scientific mostrado na figura 3.12.



Figura 3.12: Eletromagneto com refrigeração a água.

Este modelo possui duas peças polares que são ajustáveis, podendo variar o gap de 1,5 mm a 100 mm. A intensidade de campo magnético está relacionada à variação do gap e à corrente injetada. Por exemplo, com um gap de 32 mm e a corrente em 70 A, gera um campo de aproximadamente 0,965 T, figura 3.16.

3.2.1.2. Criostato

A figura 3.13 mostra o criostato modelo CR- 152, utilizado nas caracterizações com campo magnético incidente.



Figura 3.13: Criostato e a bomba de vácuo.

Esse modelo é um padrão RC-152 criogenic WORKSTATION, que consiste em um dewar de armazenamento de nitrogênio líquido e uma bomba de vácuo, para aumentar o isolamento térmico entre o dewar e o ambiente.

O sistema montado para a caracterização com campo magnético incidente é mostrado na figura 3.14.



Figura 3.14: Sistema de caracterização de fios supercondutores com campo magnético incidente.

Nesse sistema foi utilizado um porta amostra de 5 cm, menor que o usado nas caracterizações de amostras de fios retos, em virtude deste estar inserido no criostato. A figura 3.15 apresenta o criostato aberto mostrando o porta amostra.



Figura 3.15: Criostato aberto mostrando o porta amostra.

3.2.2. Procedimentos de Ensaio

Os procedimentos de ensaios para a caracterização com campo magnético externo são similares aos de caracterização sem campo magnético, exceto no modo como a amostra supercondutora é introduzida no eletromagneto, e a inserção do campo magnético na direção do fio.

Para a introdução da amostra no eletromagneto, é necessário o uso do criostato que mantém a temperatura do nitrogênio líquido a 77K. Assim, a amostra é colocada dentro do tubo do criostato, refrigerada, e introduzida entre os polos do eletromagneto.

Na incidência de campo magnético na amostra, primeiramente foi realizada a calibração do eletromagneto mostrado na figura 3.16 e, em seguida, o campo magnético foi gerado com a injeção de corrente pela fonte CC e medido por um gaussímetro.

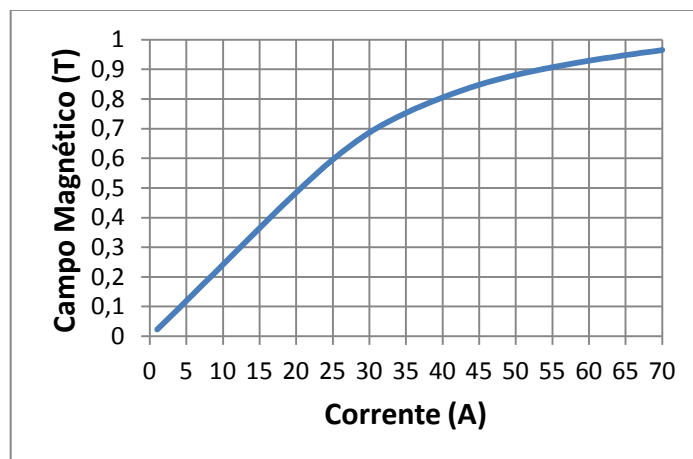


Figura 3.16: Calibração do eletromagneto com um gap de 32 mm.

Observe que, pela calibração, o campo magnético aumenta com o aumento da corrente injetada pela fonte DC no eletromagneto, até praticamente atingir a saturação.

Para essas caracterizações foram utilizados apenas alguns valores de campo magnético. Os valores de corrente e de campos magnéticos gerados para a realização das caracterizações estão apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores de corrente, com o respectivo campo magnético gerado pelos polos do eletromagneto, para as caracterizações dos fios.

Corrente (A)	Campo magnético (T)
0	0
5	0,12
15	0,365
25	0,596
35	0,753
70	0,965

Com a amostra de fio refrigerado dentro do criostato e entre os polos do eletromagneto, a fonte CC injeta corrente no eletromagneto que gera o campo magnético na direção do fio. Depois disso, os procedimentos do item 3.1.2 podem ser seguidos para caracterizar a amostra.

3.2.3. Resultados das caracterizações

Como já citado, os casos de maior relevância para a incidência de campo magnético no fio, é na direção perpendicular à face, direção c, e paralela à face, mas perpendicular a corrente, direção b, figura 3.9.

As amostras de fio supercondutor usados são os mesmos do item 3.1.3, com os mesmos parâmetros especificados na tabela 3.1.

Primeiramente foi levantada a curva $V \times I$ de cada uma das amostras dos fabricantes citados com o campo magnético incidente na direção paralela à face e perpendicular a corrente. Os resultados são mostrados na figura 3.17.

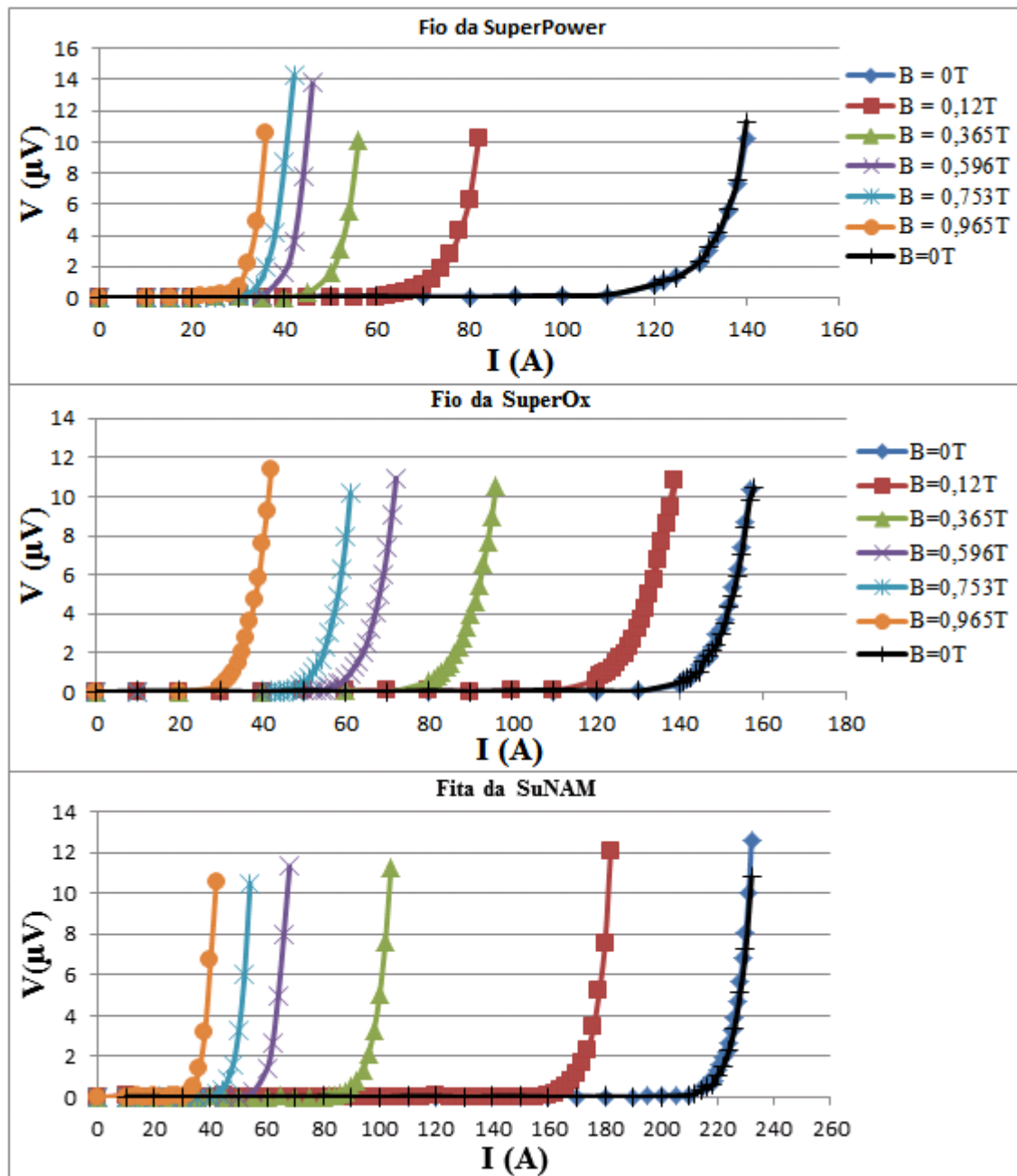


Figura 3.17: Caracterização dos fios supercondutores com campo magnético externo na direção paralela à face do fio e perpendicular à corrente, fio da SuperPower, fio da SuperOx e fio da SuNAM isolado com Kapton, respectivamente.

Em todos os resultados, observe que foi realizado o ensaio com $B = 0 T$ antes e depois da aplicação de campo magnético. Com o intuito de examinar se houve ou não degradação do fio, e pela proximidade das curvas sem campo configura-se que isso não ocorreu.

Pelas caracterizações é possível perceber que a corrente crítica realmente cai com o aumento do campo incidente nessa direção e o decaimento é apresentado na figura 3.18, para cada fio.

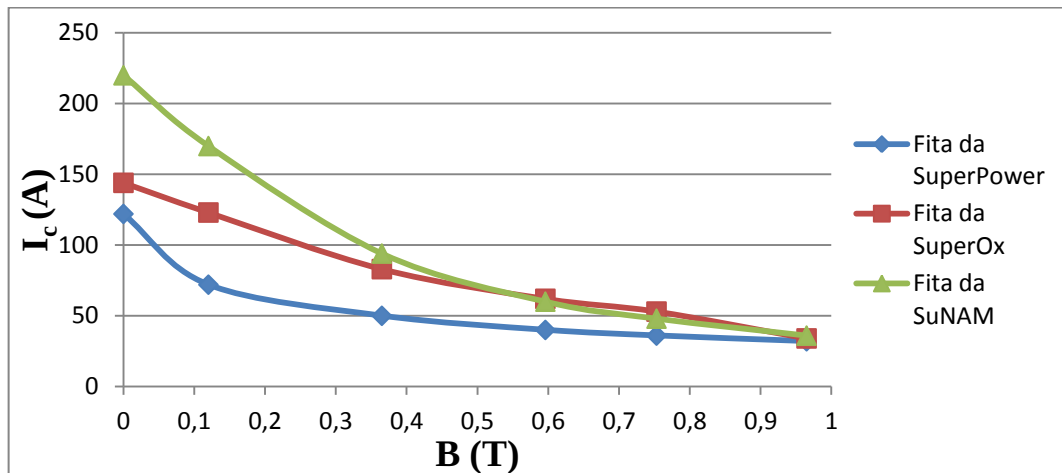


Figura 3.18: Decaimento da corrente crítica com o campo magnético paralelo a superfície do fio.

A figura 3.18 mostra que todos os fios examinados apresentam uma queda acentuada da corrente crítica, na incidência de campo magnético externo. Sendo que essa queda afeta diretamente o índice n , que também decai, como pode ser observado na figura 3.19.

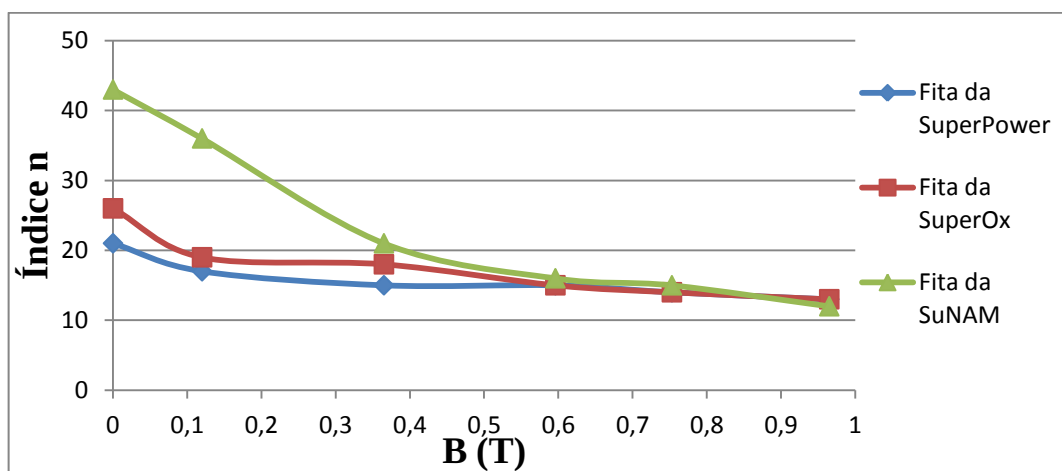


Figura 3.19: Valores do índice n nos fios supercondutores com campo magnético paralelo aplicado.

Deste modo, ainda que o fio supercondutor da SuNAM apresente maior valor de corrente crítica sem campo magnético externo, ela exhibe maior queda da corrente crítica na incidência de um campo magnético paralela a sua face e maior queda do índice n .

Apesar do campo na direção b (Figura 3.9) causar uma queda acentuada no valor de corrente crítica dos fios supercondutores, e no índice n, a incidência do campo magnético na direção c, aponta maior decaimento.

Por conseguinte, as amostras foram também submetidas a um campo magnético incidente na direção perpendicular à face e os resultados são mostrados na figura 3.20.

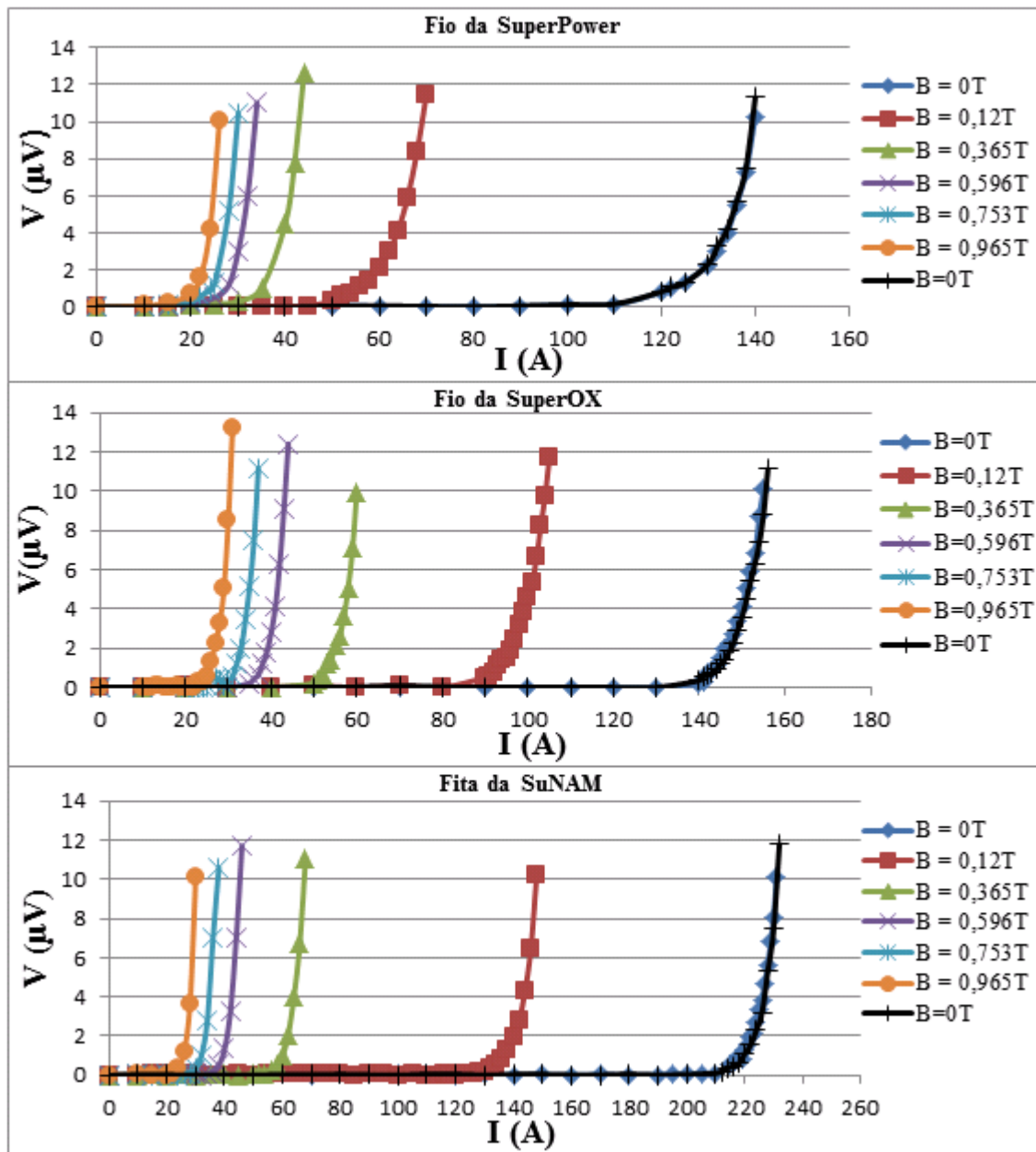


Figura 3.20: Caracterização dos Fios supercondutores com campo magnético incidente na direção perpendicular a face do fio, direção c, fio da SuperPower, fio da SupeOX e fio da SuNam isolada com Kapton, respectivamente.

Visivelmente é difícil notar a maior queda da corrente crítica com a incidência de campo magnético perpendicular, comparado ao decaimento com campo paralelo. Logo, para

melhor observação dos resultados de forma a comparar o decaimento da corrente crítica, foi feita a apresentação conforme mostra a figura 3.21.

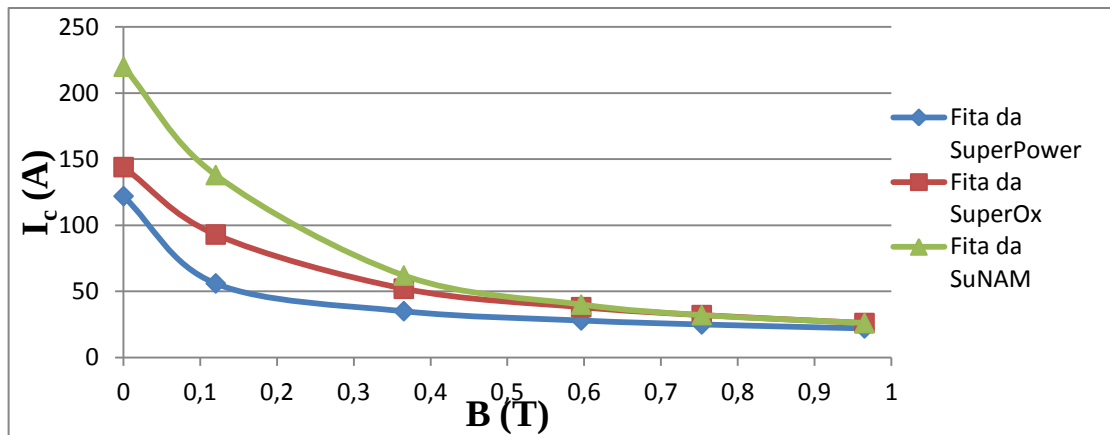


Figura 3.21: Decaimento da corrente crítica com o campo magnético perpendicular à superfície do fio.

Além do decaimento da corrente crítica constatado na figura 3.21, novamente a queda do índice n é examinado e os resultados são mostrados na figura 3.22.

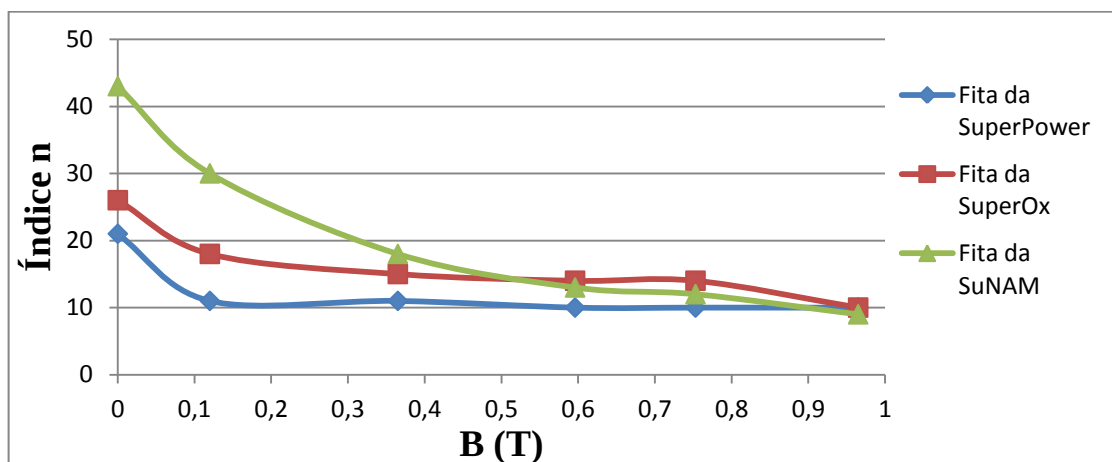


Figura 3.22: Valores do índice n nos fios supercondutores com campo magnético perpendicular aplicado.

Com a incidência de campo magnético perpendicular à face dos fios supercondutores a porcentagem de decaimento da corrente crítica e do índice n em todos os fios aumenta, sendo o fio da SuNam, mais uma vez o que apresentou a maior queda.

Nessa condição, apesar do fio da SuNam ter maior valor de corrente crítica sem campo externo e melhor custo/benefício, ele pode não apresentar condições favoráveis para aplicações em campos magnéticos. No entanto, como o objetivo é avaliar as características de isolamento em bobinas supercondutoras, a escolha recaiu sobre os fios 2G HTS com maior corrente crítica e com custo mais acessível, que são os fios da SuNAM.

4. PROTÓTIPOS DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS

Neste capítulo, serão apresentados os aspectos construtivos e os materiais utilizados, para o desenvolvimento dos três protótipos de bobinas supercondutoras. Uma com isolamento Kapton entre as espiras (I), outra sem isolamento (NI) e finalmente uma sem isolamento e com um fio de cobre em paralelo, entre as espiras de fios supercondutores (NIC). Essas bobinas têm o formato em panqueca dupla (ou do inglês *double pancake*) devido à facilidade de enrolamento. A figura 4.1 apresenta os três protótipos dessas bobinas.



Figura 4.1: Protótipos das bobinas supercondutoras.

Para efeito de comparação dos resultados, nesse estudo, todos os protótipos têm seus materiais e aspectos construtivos idênticos, exceto apenas a configuração de isolamento.

Na construção desses protótipos, alguns aparatos foram essenciais na montagem, os quais são apresentados e descritos nos próximos subtópicos.

4.1. CARRETÉIS

Para a construção dos carretéis, foi utilizado um tarugo de Teflon, material isolante e de boas características térmicas para o uso em nitrogênio líquido. O tarugo de Teflon foi usinado na oficina mecânica do CEPEL, seguindo o projeto desenhado em [63] com todas as dimensões especificadas mostradas na figura 4.2.

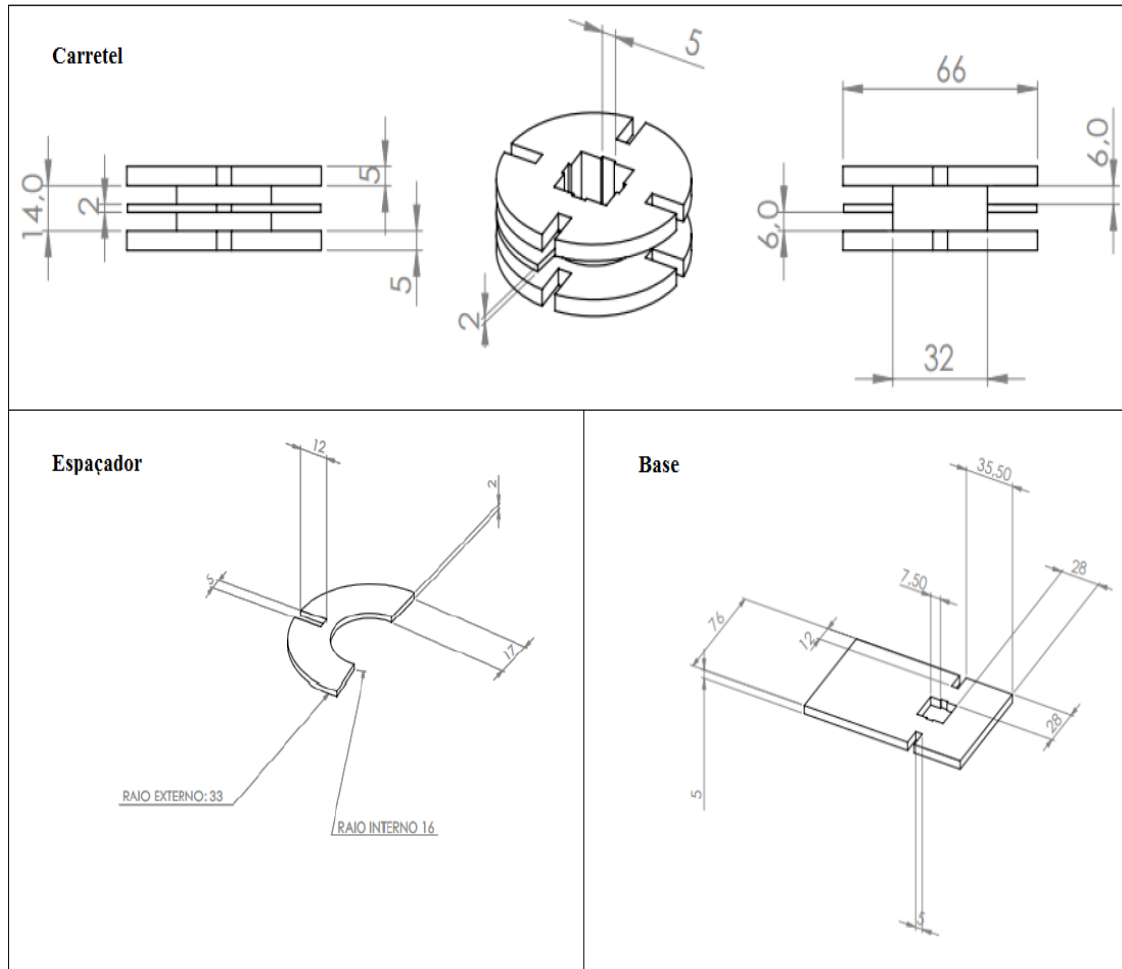


Figura 4.2: Projeto do carretel das bobinas de panqueca dupla. Adaptada de [63].

A construção foi dividida em três partes como mostra a figura 4.2. Primeiramente foi usinado o tarugo para obter o carretel, parte no qual foi feito o enrolamento do fio supercondutor. Em seguida, para complemento do carretel, foram desenvolvidos o espaçador de panquecas e a base, também em Teflon. O espaçador tem o formato de semicírculo, de forma a encaixar na parte intermediária do carretel, precisamente em cima da hélice de fio que liga as duas panquecas. A intenção é evitar que haja contato entre as espiras da panqueca superior com a panqueca inferior, que poderia gerar um curto-circuito e danificar a bobina. A base tem o formato mostrado na figura 4.2 com os furos propícios para o encaixe do carretel. Ela serve de apoio e facilita o manuseio das bobinas nos ensaios, evitando possíveis danos no fio. Nela também são presos com parafusos os terminais de corrente [63].

4.2. TERMINAIS DE CORRENTE

Esses terminais têm a função de prensar as pontas dos fios sobre o suporte, de modo a garantir o contato elétrico. Todos os ensaios realizados com as bobinas exigem a injeção de corrente neles, pois caso a excitação fosse feita diretamente na bobina sem o terminal esta poderia ser danificada com maior facilidade.

O material utilizado para estes terminais foi o cobre, devido à sua alta condutividade elétrica, resistência à corrosão e flexibilidade, que o torna ideal para ligações, conexões e realização de soldas [64].

Em cada bobina, foram utilizados dois terminais idênticos que recebem as duas pontas dos fios supercondutores que saem das panquecas. Nesses terminais as pontas são prensadas com o auxílio de uma pequena peça de cobre e parafusos, garantindo o contato elétrico. A figura 4.3 mostra o terminal, a pequena peça de cobre e suas dimensões.

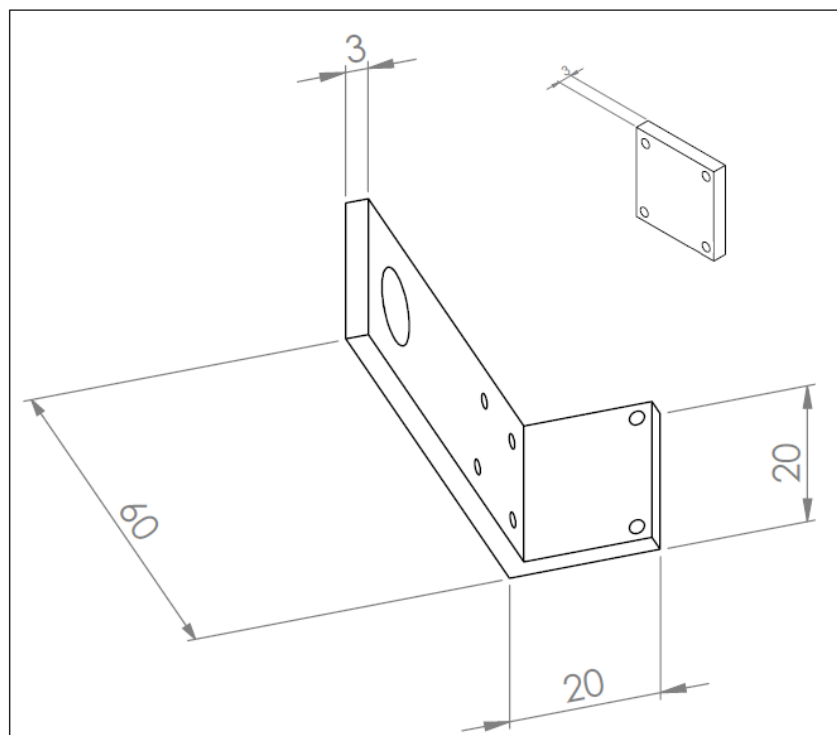


Figura 4.3: Terminal de corrente e peça de encaixe do fio supercondutor, adaptada [63].

Com o carretel, o espaçador, a base, os terminais e a pequena peça de cobre o protótipo foi montado de acordo com a figura 4.4.

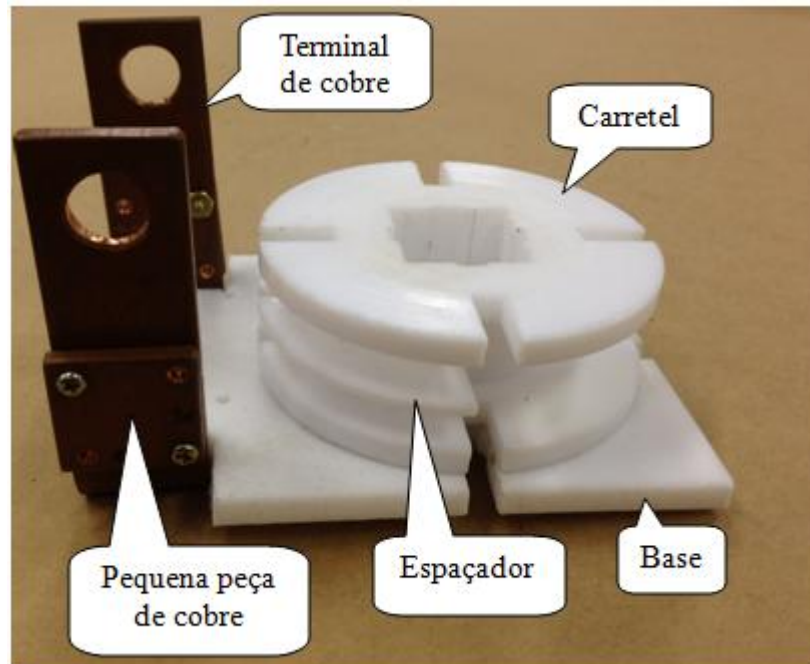


Figura 4.4: Carretel sobre a base com o espaçador, os terminais e a pequena peça de cobre.

De modo a assegurar um bom contato elétrico, foi utilizada uma folha de índio que por se tratar de um material mole permite que se molde entre o fio e o terminal melhorando o contato elétrico. A figura 4.5 mostra como é feito o contato, utilizando a folha de índio.

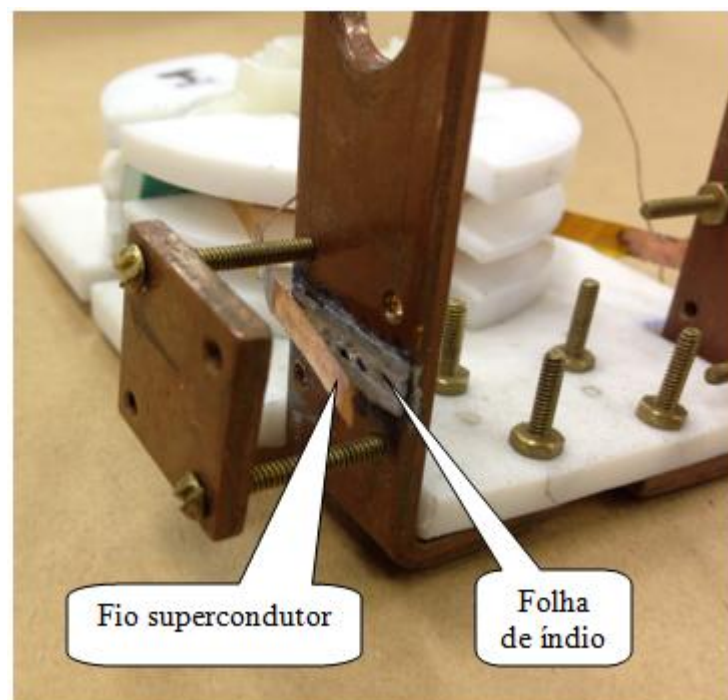


Figura 4.5: Configuração de encaixe do fio supercondutor no terminal de corrente com folha de índio.

4.3. FIO DE COBRE E FIOS SUPERCONDUTORES

Nesse trabalho, para o enrolamento das bobinas, foram utilizados três tipos de fios, um fio de cobre sem isolamento, um fio supercondutor sem isolamento e um fio supercondutor com isolamento Kapton. O fio de cobre é um convencional de 4 mm de largura e 0,1 mm de espessura, mostrado na figura 4.6, utilizado no enrolamento da bobina NIC para separar as espiras supercondutoras.



Figura 4.6: Fio de cobre utilizado no enrolamento da bobina NIC.

Os fios supercondutores utilizados foram do fabricante SuNAM, modelos 2G HTS SCNK 04150 (com Kapton) e 2G HTS SCN 04200 (sem Kapton), mostrado na figura 4.7, com todas as suas especificações apresentadas na tabela 3.1.



Figura 4.7: Fio supercondutor da SuNAM com e sem Kapton.

Como mostra a tabela 3.1, o fabricante especifica um valor mínimo para a corrente crítica de ambos os fios. No capítulo 3, foram feitas as devidas caracterizações para certificar a veracidade desse intervalo, considerando apenas pequenas amostras, e no fio sem Kapton o valor de corrente crítica foi 6A menor que a especificada.

4.4. MESA BOBINADEIRA

O enrolamento das três bobinas foi realizado no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), utilizando a mesma bobinadeira descrita em [21], apresentada abaixo:



Figura 4.8: Mesa bobinadeira do LASUP.

Em [15] são apresentados alguns ajustes que foram feitos para adequar a mesa a enrolamentos de bobinas *single pancake racetracks*. Dentre esses ajustes, o volante 1 especificado na figura 4.8, foi adaptado para o encaixe padrão dos carretéis em que a SuperPower armazena o fio para transporte. Nesse estudo, como já citado, o fio utilizado nas bobinas foi do fabricante SuNAM, que apresenta um padrão dos carretéis diferente dos da SuperPower, como pode ser visto na figura 4.9. Então, para o enrolamento das bobinas foram necessários novos ajustes no volante 1.



Figura 4.9: Carretel da SuNam e da SuperPower para transporte de Fios supercondutores.

Após esses pequenos ajustes, foi determinado o número de espiras de cada bobina em função da quantidade de fio supercondutor da SuNAM disponível (tabela 3.1), por precaução foram utilizadas apenas 470 cm de fio supercondutor para cada bobina, pois, caso houvesse um *quench*⁴ que destruísse alguma das bobinas durante os ensaios, ainda poderia ser construída outra. Com esse comprimento de fio especificado, o número de espiras pôde ser estimado usando a expressão de [15].

$$C_{total} = \pi * N * (2 * R_0 + N * b) \quad (5.1)$$

Onde:

C_{total} – comprimento total de fio supercondutor

N – Número de espiras

R_0 – Raio interno

b – Espessura do fio

Considerando as dimensões especificadas na tabela 3.1, a espessura do fio de cobre e o comprimento total de fio supercondutor utilizado, foram calculados N , o número de espiras das bobinas, resultando em $N = 36$ espiras na bobina NIC, $N = 36$ na bobina I e $N = 38$ espiras na bobina NI. Em virtude da limitação pelo comprimento do fio, o número de espiras de todas as bobinas foi fixado em 36.

Após a determinação do número de espiras, foram feitos os enrolamentos das bobinas. Inicialmente foi feito o enrolamento da bobina I, figura 4.10. Nessa bobina foi necessária a retirada do Kapton nos locais onde se pretendia realizar os contatos elétricos, o que exige certo cuidado para não danificar o fio supercondutor.

⁴ Uma transição abrupta, inesperada e irreversível do estado supercondutor para o estado normal.

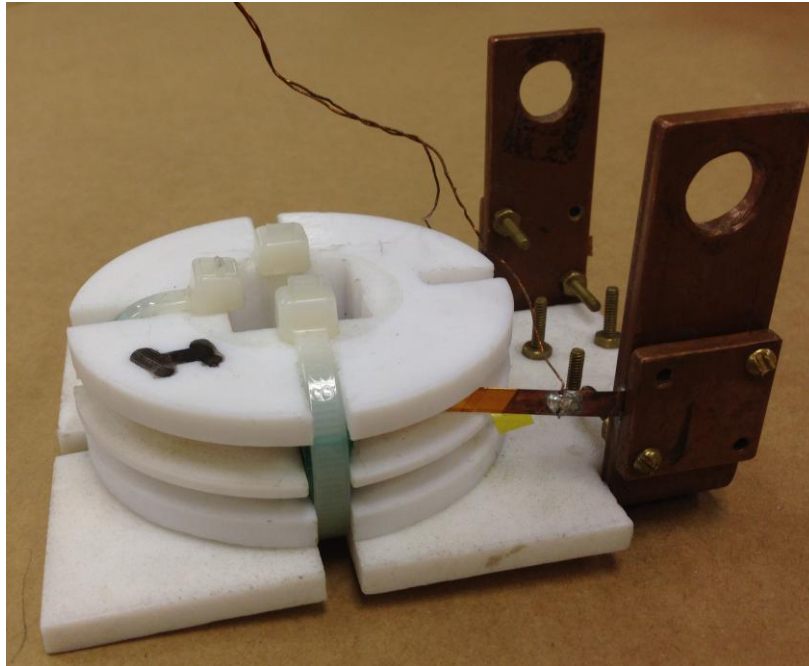


Figura 4.10: Bobina supercondutora com isolamento

Em seguida, foi feito o enrolamento da bobina NI, figura 4.11. Nessa bobina, por não apresentar isolamento, os contatos elétricos são feitos diretamente no fio, o que diminui os riscos de danificar o fio em relação à bobina I.

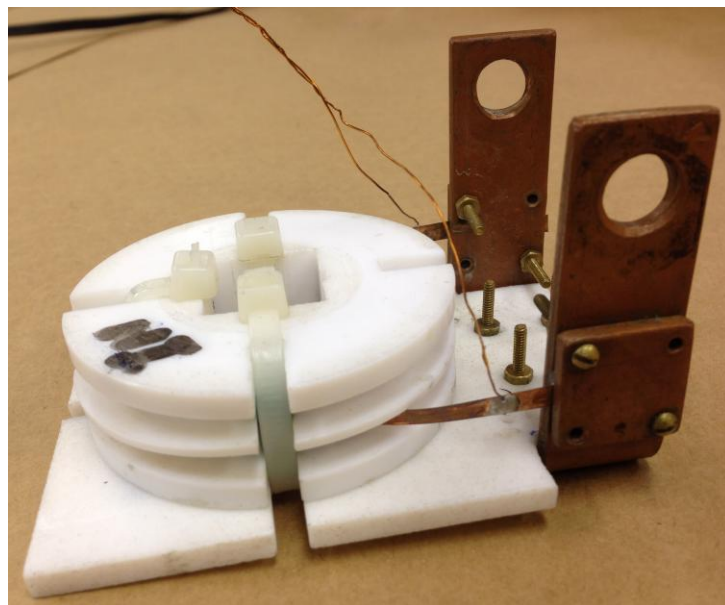


Figura 4.11: Bobina sem isolamento

Por fim, foi realizado o enrolamento da bobina NIC, figura 4.12, que exigiu maior cuidado em decorrência do enrolamento simultâneo do fio supercondutor com o de cobre.

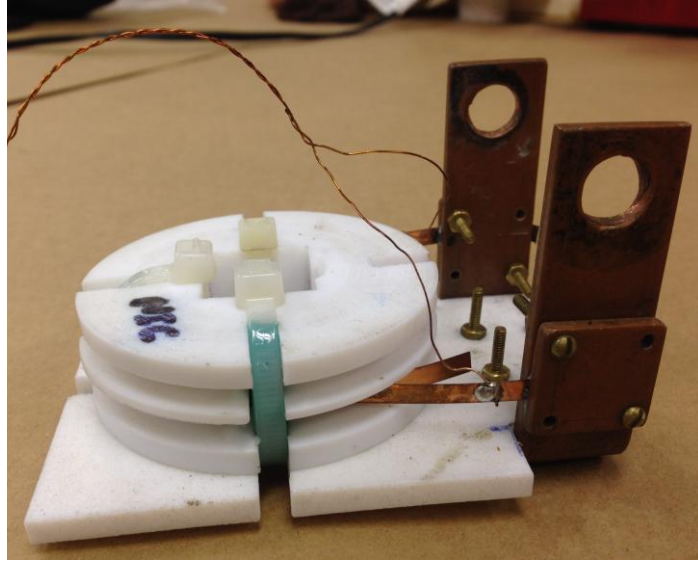


Figura 4.12: Bobina sem isolamento com o fio de cobre entre as espiras.

Para realizar o enrolamento dessa bobina foi utilizado outro carretel com o fio de cobre. As bobinas prontas para a realização dos ensaios são mostradas na figura 4.1. Nela podemos observar os contatos de tensão soldados próximos aos terminais de corrente e as braçadeiras utilizadas para exercer pressão nas espiras.

5. ENSAIOS DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS

Esta etapa do trabalho apresentará os ensaios realizados com o propósito de se obter os resultados necessários para a avaliação das características elétricas e magnéticas das bobinas supercondutoras, levando em consideração as configurações de isolamento já apresentadas. Inicialmente, foram feitas as caracterizações em corrente contínua sem campo magnético externo e o mapeamento de campo magnético para avaliar alguns fatores que afetam o parâmetro crítico I_c . Em seguida, foi feita uma análise de carga e descarga de modo a investigar a estabilidade térmica e a corrente de operação das bobinas. Por fim, foi realizado o levantamento das perdas resistivas em corrente alternada, com o intuito de analisar as diferentes configurações de isolamento e averiguar se as bobinas supercondutoras sem isolamento também são vantajosas em CA, visando à aplicação dessas bobinas em equipamentos elétricos.

5.1. CARACTERIZAÇÕES DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS EM CORRENTE CONTÍNUA (SEM CAMPO MAGNÉTICO INCIDENTE)

As bobinas supercondutoras apresentam algumas restrições operacionais que podem ser observadas com o levantamento da curva $V \times I$. O parâmetro crítico I_c em bobinas depende não apenas da temperatura e do campo magnético incidente, como em amostras retas, mas também do próprio campo magnético induzido (autocampo). Deste modo, é de extrema importância o conhecimento das curvas $V \times I$ das bobinas, a fim de que elas possam ser utilizadas sem exceder a I_c e serem danificadas [15].

O levantamento da curva $V \times I$ de bobinas supercondutoras segue a mesma linha da caracterização de amostras de fios retos, o sistema de medição e o método utilizado são os mesmos.

Apesar do método aplicado às bobinas ser análogo, a queda de tensão se refere ao comprimento total do fio, pois, os contatos de tensão são próximos aos contatos de corrente, e são localizados nas extremidades do fio, como ilustrado na figura 5.1.

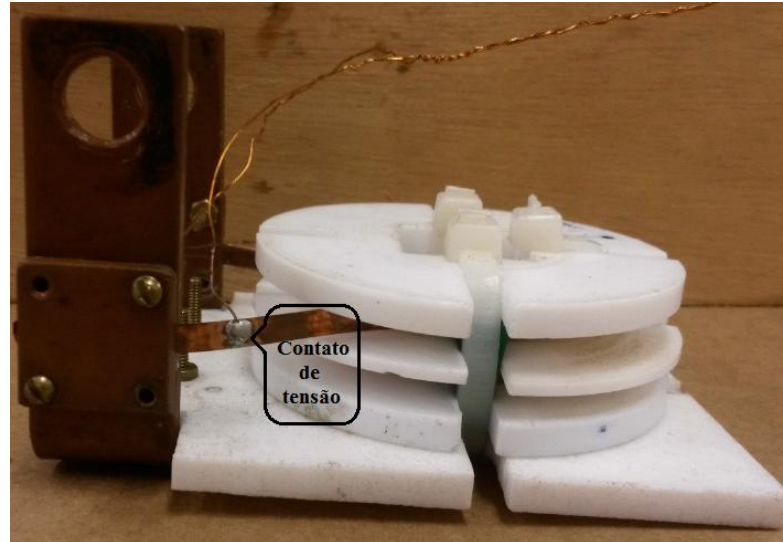


Figura 5.1: Contato de tensão na bobina NI.

Como mencionado no capítulo anterior, o comprimento de fio supercondutor utilizado nas bobinas foi de 470 cm, logo foi considerada a mesma distância entre os contatos de tensão.

Os resultados das caracterizações são mostrados a seguir, com as respectivas curvas $V \times I$ e suas análises. A cada amostra foram feitos dois ensaios (Ensaio 1 e Ensaio 2) com os mesmos parâmetros e com o objetivo de verificar a repetibilidade dos resultados.

A princípio, foi realizada a caracterização da bobina supercondutora com isolamento Kapton (I) e o levantamento da curva $V \times I$ é apresentado na figura 5.2.

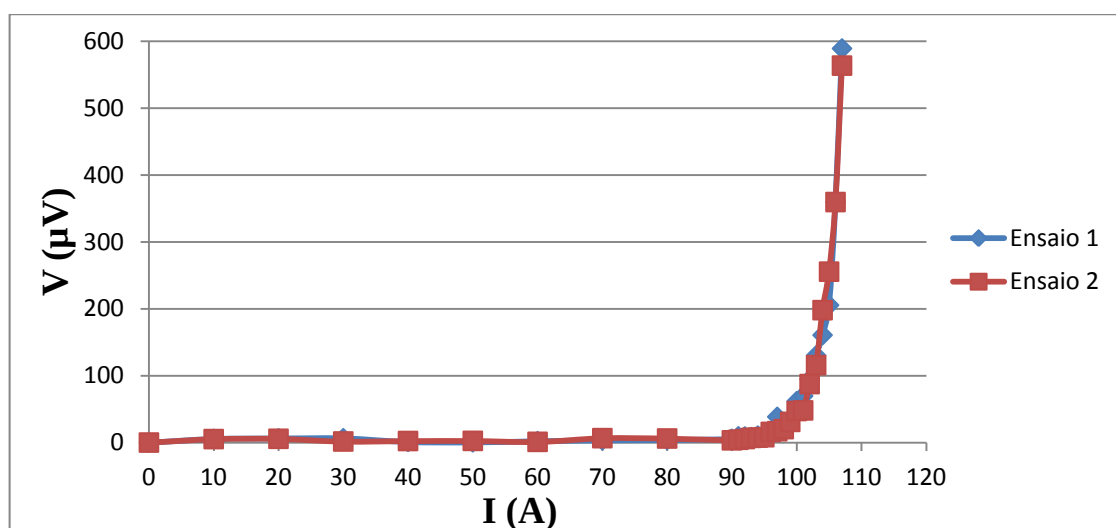


Figura 5.2: Curva $V \times I$ da bobina I.

Na figura 5.2, sendo a distância entre os contatos de tensão de 470 cm, então pelo critério adotado de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$, a corrente crítica é de 107A, corrente no qual a tensão crítica é de $470 \mu\text{V}$.

Como observado e descrito no capítulo 3, a corrente crítica para uma amostra de fio com isolamento Kapton da SuNAM é de 220A (sem campo), e a corrente crítica da bobina supercondutora com isolamento Kapton, conforme mencionado acima, é de 107A. A diminuição de 51,4% da corrente crítica da bobina em relação à amostra reta deve-se ao fato da bobina gerar um autocampo magnético que afeta I_c .

O efeito do autocampo também é perceptível na corrente crítica da bobina NI em relação à amostra reta de fio sem Kapton, como ilustra a figura 5.3.

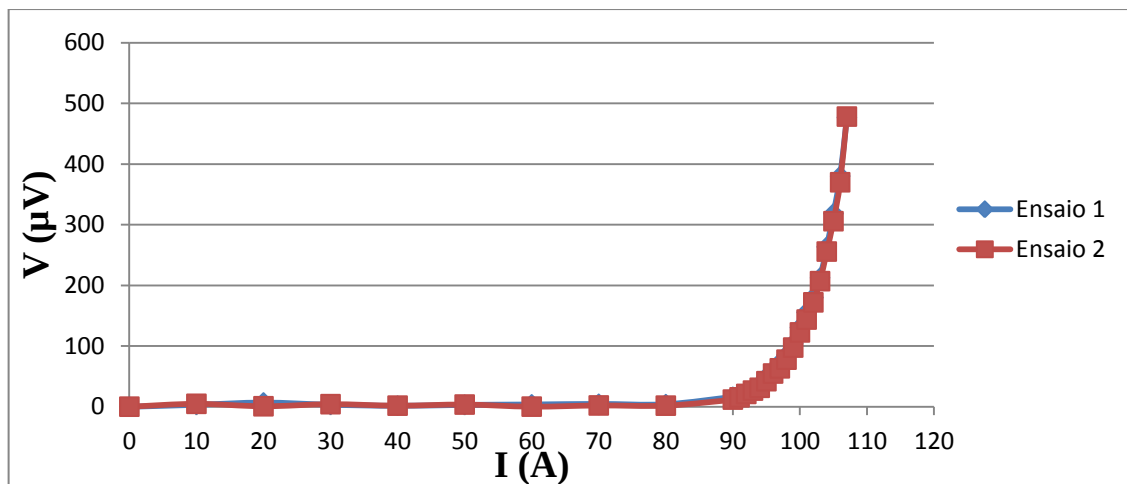


Figura 5.3: Curva VxI da bobina NI.

Considerando as mesmas condições e o mesmo critério utilizado na caracterização da bobina com isolamento, a corrente crítica na bobina sem isolamento também é de 107A.

O fato da corrente crítica das bobinas com e sem isolamento serem iguais é meramente coincidência, pois apesar das bobinas serem geometricamente iguais, os segmentos de fios utilizados para o enrolamento foi de lotes distintos.

Nessa bobina, observe que a transição é um pouco mais lenta, $n=20$, que na bobina I, $n=37$, isso pode estar relacionado ao percurso da corrente, quando esta se aproxima do seu valor crítico, devido ao não isolamento, parte da corrente é desviado pelo contato entre as espiras.

Na bobina NIC, imaginava-se que a transição também fosse lenta como na bobina NI, pois possíveis caminhos de corrente poderiam surgir e também desviar a corrente, entretanto, a transição é rápida, figura 5.4, como o observado na bobina I.

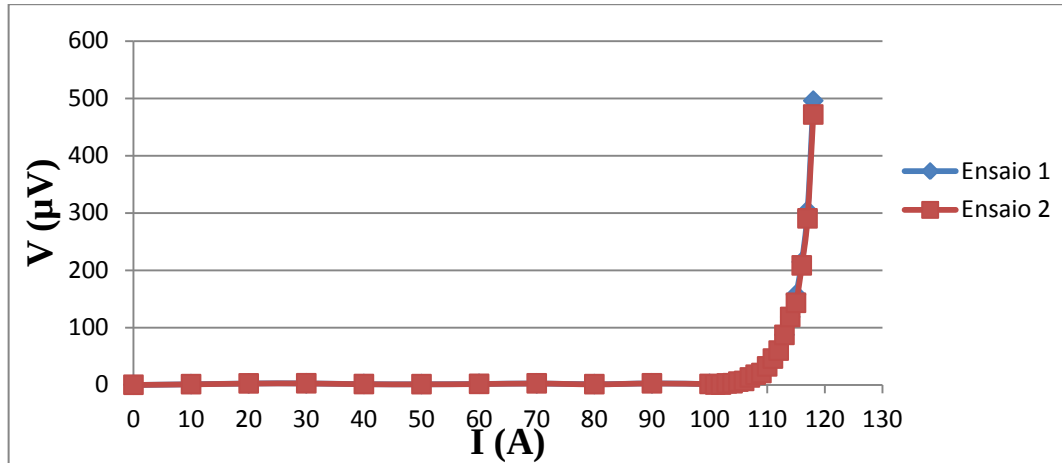


Figura 5.4: Curva VxI da bobina NIC.

Essa semelhança na transição da bobina NIC, $n=37$, com a bobina I pode estar associada com o fio de cobre funcionar como um shunt devido a sua maior resistência em relação ao fio supercondutor.

Por ser um bom condutor térmico, o fio de cobre também funciona como uma âncora térmica, que ajuda a manter a temperatura, evitando sobreaquecimento.

Todas essas caracterizações foram realizadas com pulsos de corrente de 500 ms. Esses pulsos foram adotados com essa largura a fim de obter um tempo mínimo para estabilizar a leitura pelo nanovoltímetro e para evitar o sobreaquecimento da bobina em *hot spots*.

Como já mencionado, a diminuição da corrente crítica nas bobinas em relação à amostra de fita reta é devida ao autocampo gerado pela própria bobina, deste modo, a realização do mapeamento se torna importante.

5.2. MAPEAMENTO DE CAMPO MAGNÉTICO NAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS

Para uma análise mais detalhada do autocampo na bobina foi realizado o mapeamento da densidade de fluxo magnético para uma determinada corrente, para o conhecimento do comportamento desse campo induzido e a sua disposição no espaço, principalmente na faixa das espiras supercondutoras.

A realização deste foi feita utilizando um sistema de mapeamento de campo magnético.

5.2.1. Sistema de mapeamento de campo magnético

O sistema automatizado de mapeamento do campo magnético utilizado é do LASUP e é mostrado na figura 5.5.

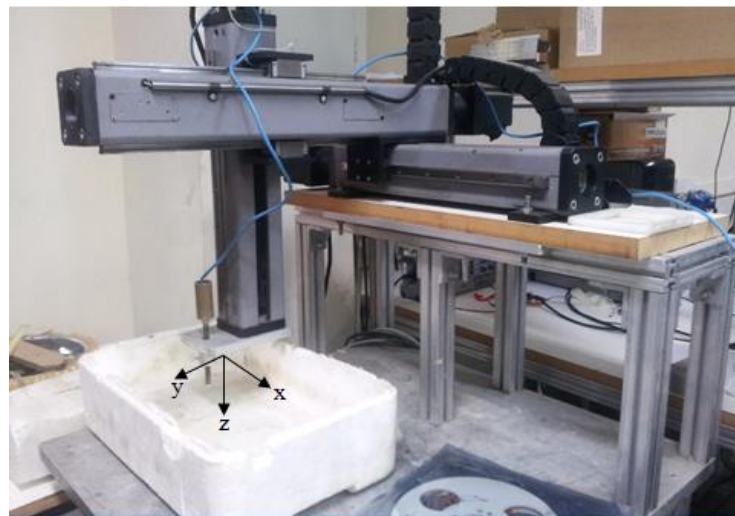


Figura 5.5: Mesa de mapeamento de campo magnético do LASUP.

Esse sistema é composto por uma mesa que se movimenta nas direções xyz ; uma ponteira que contém um sensor de efeito Hall, com a finalidade de medir a intensidade do campo magnético perpendicular à superfície da mesa, principalmente a componente B_z ; e um computador que através de um programa desenvolvido em Labview, sistematiza a aquisição de dados e administra a movimentação [15], [65].

Com o sistema da figura 5.5, foram realizados os ensaios de mapeamento de campo nas três bobinas.

5.2.2. Realização dos ensaios do mapeamento de campo

Para a realização dos ensaios conectam-se os cabos da fonte de corrente na bobina, que é posicionada dentro de um isopor com nitrogênio líquido. Feito isso, a fonte de corrente foi ligada e ajustada para a corrente desejada e os parâmetros são ajustados na interface do programa em Labview pelo computador.

5.2.3. Procedimentos de ensaios e resultados alcançados

O mapeamento de campo magnético das três bobinas supercondutoras I, NI e NIC, foram feitas com a corrente contínua aplicada na bobina de 62 A, o que corresponde a 60% de I_c das bobinas construídas, por precaução. Com as bobinas situadas no plano x e y, a varredura foi feita no plano paralelo à bobina com uma distância de 1 mm acima da mesma, com passos de 1 mm nas direções x e y, em uma área total de 50 x 50 mm². A cada ponto (x,y) era medida a densidade de fluxo magnético produzido pela bobina numa direção paralela ao seu eixo, ou seja, na direção z. Os resultados de indução magnética obtidos com o procedimento descrito acima para as três bobinas são apresentados na figura 5.6.

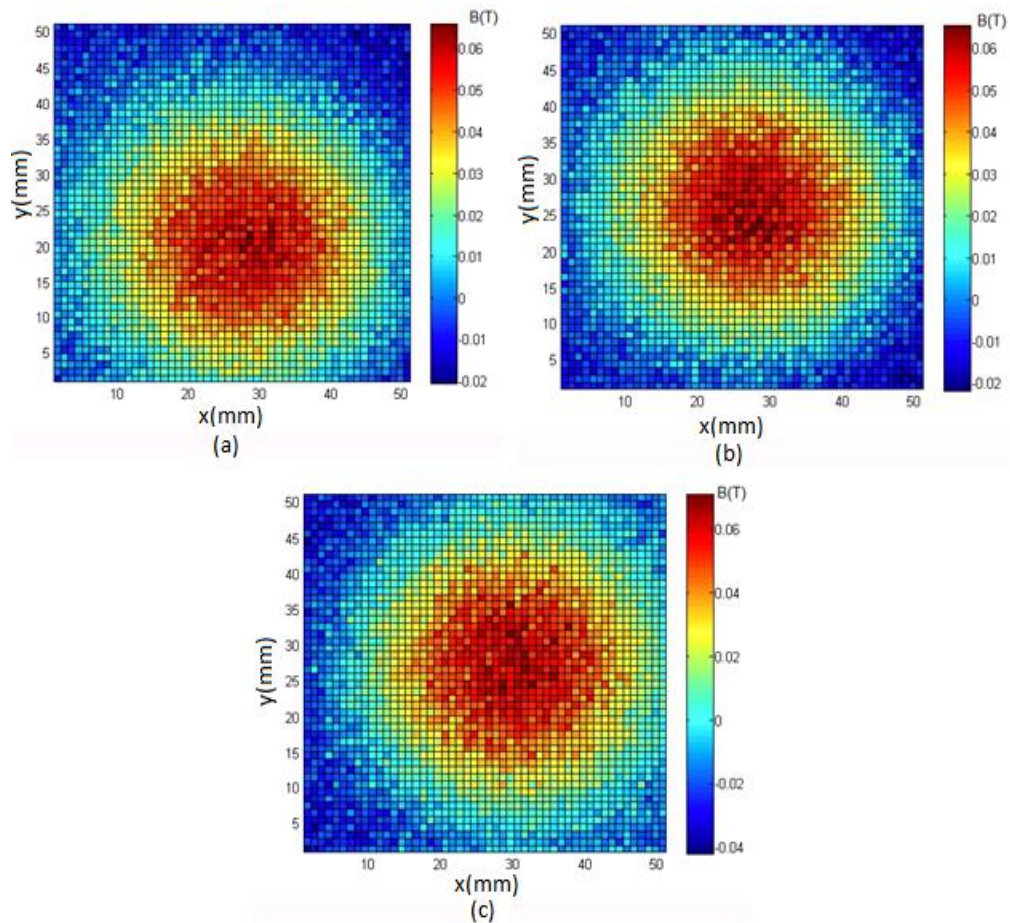


Figura 5.6: Mapeamento de campo magnético das bobinas supercondutoras: (a) I, (b) NI e (c) NIC.

Pelos resultados obtidos observa-se que a densidade de fluxo magnético nas três bobinas é praticamente a mesma, pois o autocampo gerado só depende da geometria e da corrente, independente da configuração de isolamento. Como as bobinas apresentam as mesmas configurações geométricas então para uma corrente de mesma magnitude aplicada, esse resultado não poderia ser diferente.

A indução magnética produzida pela corrente na bobina supercondutora é que atua sobre as próprias espiras reduzindo a corrente crítica. Destaca-se que nesse mapeamento só foi medida a componente na direção z , ou seja, B_z , que pela figura 5.7, considerando os eixos a , b e c , é a direção b , paralela à superfície do fio.

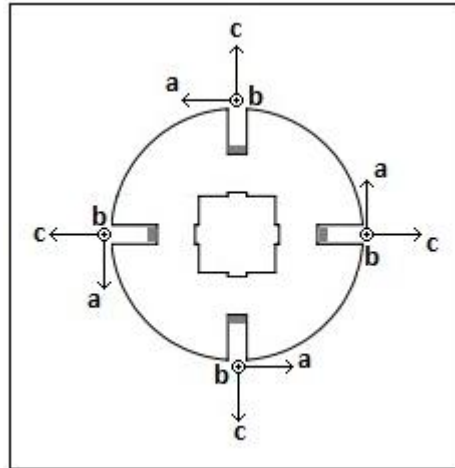


Figura 5.7: Vista superior da bobina *double pancake*, como os eixos a , b e c que correspondem a y , z e x do sistema de mapeamento, respectivamente.

As outras componentes não mapeadas, inclusive a componente perpendicular à superfície do fio, que pela análise feita no capítulo 3, é a que mais reduz a corrente crítica e seguramente afeta a I_c das bobinas.

Como também pode ser observado na figura 5.6, o campo magnético é mais intenso no interior das bobinas, pois essa região apresenta o fluxo enlaçado por mais espiras. Isso faz com que as espiras mais internas estejam sujeitas a um campo mais intenso e passem a ser a região onde normalmente ocorre o *quench*.

Para verificar a consistência das medidas de mapeamento de campo realizado experimentalmente, o valor de B no interior do núcleo foi simulado, considerando uma distribuição homogênea de corrente nos condutores da bobina. As simulações foram feitas pelo método de elementos finitos (MEF), usando o software Maxwell. A simulação realizada pelo MEF foi 2D axissimétrica, que permite uma boa aproximação para a geometria da bobina construída. O objetivo dessa simulação era estudar o B_z ao longo da direção radial e comparar esse resultado com o do mapeamento.

Na simulação, o fio supercondutor foi modelado em cobre, e foi considerado que a corrente atravessa toda a sua área (não considerando somente a faixa de $1\mu\text{m}$ da cerâmica supercondutora). As simulações foram feitas de modo que foi se duplicando o refino da malha

até que os valores medidos tivessem um erro menor que 1%. Adotou-se uma distância de 100% da área dos elementos simulados até a região de contorno (onde o potencial magnético é zero).

A comparação entre os resultados simulados e medidos está apresentada na figura 5.8.

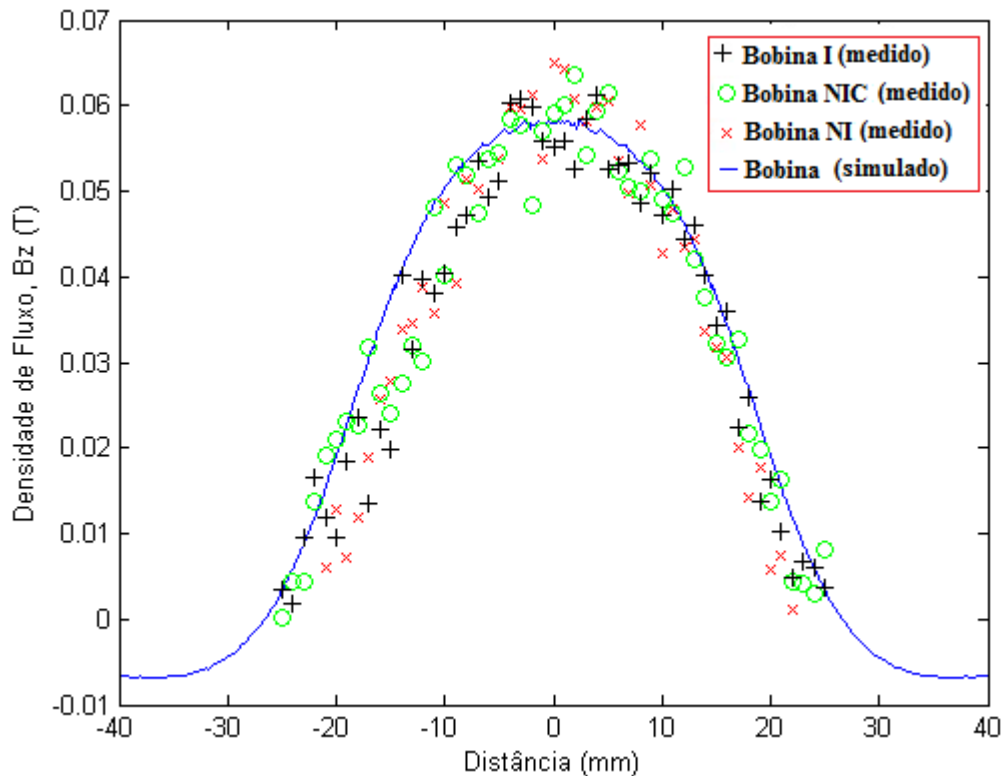


Figura 5.8: Comportamento do campo magnético na direção central do eixo x da bobina com centro em zero e com 33 mm de raio.

Pelo resultado, o campo magnético central na direção x, figura 5.8 segue o mesmo comportamento que a distribuição de campo alcançada no mapeamento experimental, estando num crescente até atingir o seu máximo no centro da bobina. Os valores simulados e mapeados experimentalmente estão bem próximos, mostrando que o modelo prático seguido é razoavelmente aceitável para esse tipo de análise.

Após as caracterizações, para a obtenção de I_c e o mapeamento de campo magnético para avaliar o comportamento do campo magnético nas bobinas, foi realizada o ensaio de carga e descarga com o intuito de investigar a estabilidade térmica e a corrente de operação.

5.3. MEDIDAS DE CARGA E DESCARGA DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS

Um dos estudos mais importantes desse trabalho é o dos testes de carga e descarga de bobinas supercondutoras. Nesse estudo, é possível comparar melhor a influência do isolamento da bobina com fio 2G em suas propriedades elétricas. Para a realização dessa análise, alguns ensaios foram necessários e serão descritos ao longo desse tópico.

5.3.1. Procedimentos de ensaio

Os ensaios foram realizados no laboratório de supercondutividade da UFF, utilizando uma fonte de corrente contínua, modelo 6860 da Agilent controlada por um computador e uma mesa de mapeamento de campo magnético semelhante ao descrito no item 5.2.1, mostrado na figura 5.9. Para o controle da fonte foi desenvolvido um programa em Matlab, apresentado no anexo B. Este programa foi feito para submeter à bobina supercondutora ensaiada a um processo de carga e descarga bem próximo a uma rampa.

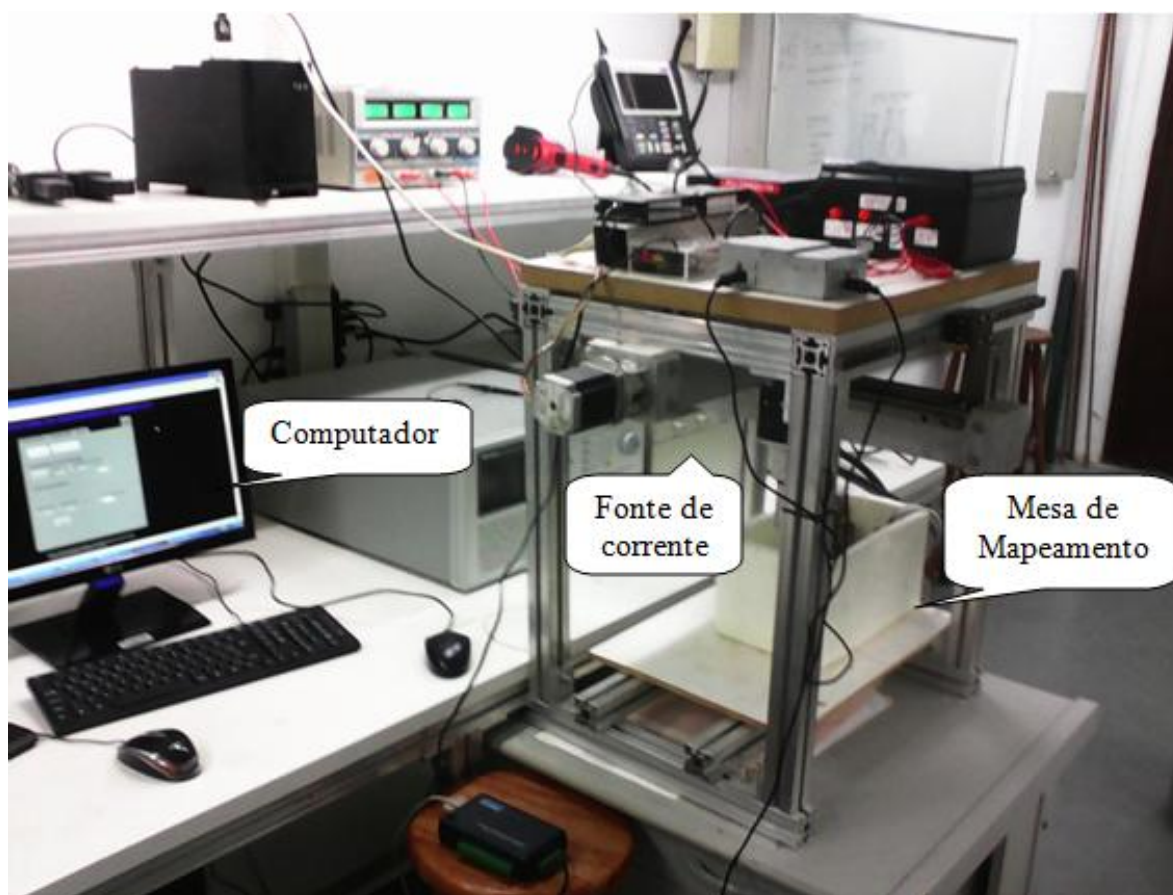


Figura 5.9: Sistema de mapeamento de campo magnético da UFF.

Em virtude de a fonte de corrente utilizada não apresentar opções, tais como subir em rampa ou em degrau, até o nível de corrente contínua desejada, se estabeleceu um algoritmo para executar tal comportamento. A princípio, a fonte é ligada (chaveamento), e ajustada para 0A, evitando picos de corrente. Até o patamar de corrente desejado, a corrente foi incrementada de 1 em 1A, em intervalos de 1s. Ao atingir esse patamar, é tomada a primeira medida de tensão e a corrente é mantida por 10s. Nesse tempo são feitas mais quatro medidas de tensão, de modo a avaliar o comportamento desta no patamar e verificar se houve ou não um aumento devido ao possível aquecimento em carga. Tem-se então o processo de descarga, onde a corrente cai de 1 em 1A, em intervalos de 1s, até que a corrente seja extinta.

A comunicação entre o computador e a fonte foi feita via interface GPIB. Inicialmente os cabos da fonte de corrente foram conectados nos terminais da bobina, que foi submergida em nitrogênio líquido. Em seguida, aplica-se uma rampa de corrente na bobina, produzindo o autocampo que é medido pelo sistema de mapeamento. Essa medida de campo magnético, realizada com o sistema da UFF, foi feita com a ponteira posicionada no centro da bobina medindo o campo no ponto central. Por fim, os dados, salvos em arquivos textos (txt), foram transportados ao *Excel*, para gerar as curvas.

5.3.2. Resultados obtidos

A cada rampa de corrente um novo ensaio foi realizado e foram medidos os valores de campo magnético. A figura 5.10 mostra as rampas de corrente para medir esses valores.

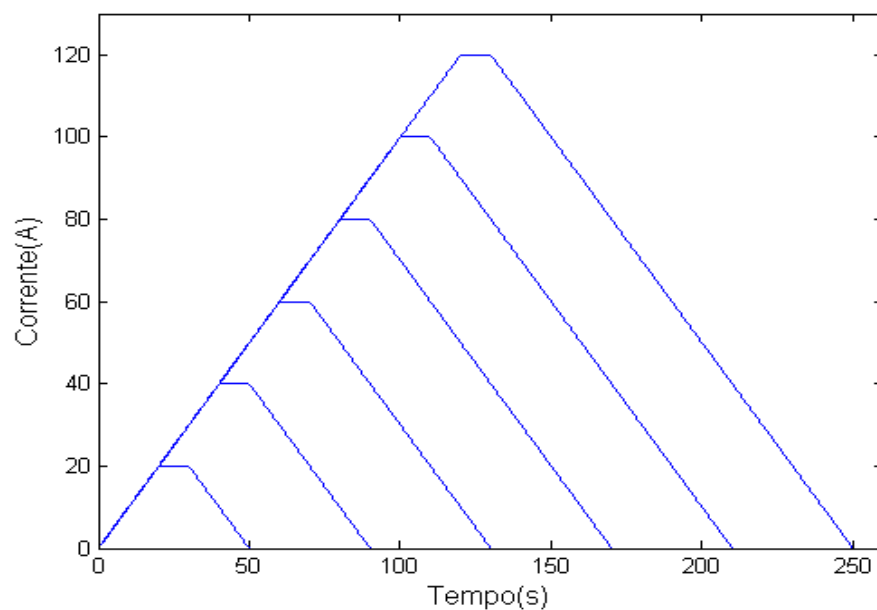


Figura 5.10: Rampa de corrente requisitada da fonte, com patamares de 20 em 20 A, usado no ensaio de carga e descarga das bobinas I, NI e NIC.

Como pode ser observada, a corrente foi aumentada com patamares de 20 em 20 A, com uma taxa de subida e descida de 1A/s e com um tempo no patamar de 10 s, até atingir um valor de corrente um pouco acima da corrente crítica, justamente para verificar o efeito do campo magnético nas bobinas. A taxa e o patamar foram definidos com base na literatura [4] [5]. No entanto, o tempo no patamar citado foi de 300s, diferente dos 10s usados aqui. Esse tempo foi estipulado por prevenção, para não danificar a bobina e comprometer o trabalho, em razão da quantidade de fio supercondutor reduzido, contido no laboratório. Os valores de corrente injetados pela fonte não são sempre os requisitados desta, portanto foram medidas, as correntes, e inseridas nas curvas de cada ensaio.

O resultado do campo magnético em função do tempo na bobina I está mostrado na figura 5.11.

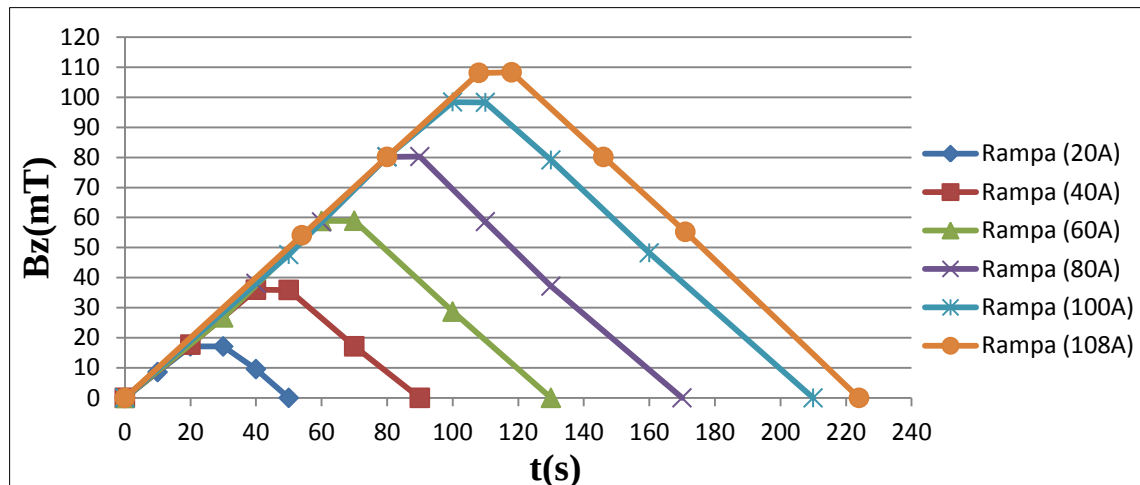


Figura 5.11: Campo magnético central em função do tempo na bobina I.

A rampa de corrente aplicada teve pico em 108A, valor um pouco acima da corrente crítica da bobina ($I_c=107A$) medida anteriormente. Por segurança, para evitar a queima da bobina, optou-se por não ir além dessa corrente, pois na corrente de 109A observou-se um aumento brusco na tensão, dando indícios de que a bobina seria danificada caso permanecesse excitada continuamente nesse estado. O patamar de 109 A não foi mostrado na figura 5.11, pois como a tensão aumentou repentinamente a fonte foi imediatamente desligada.

A bobina NI apresenta um comportamento diferente da bobina I, como mostra a figura 5.12.

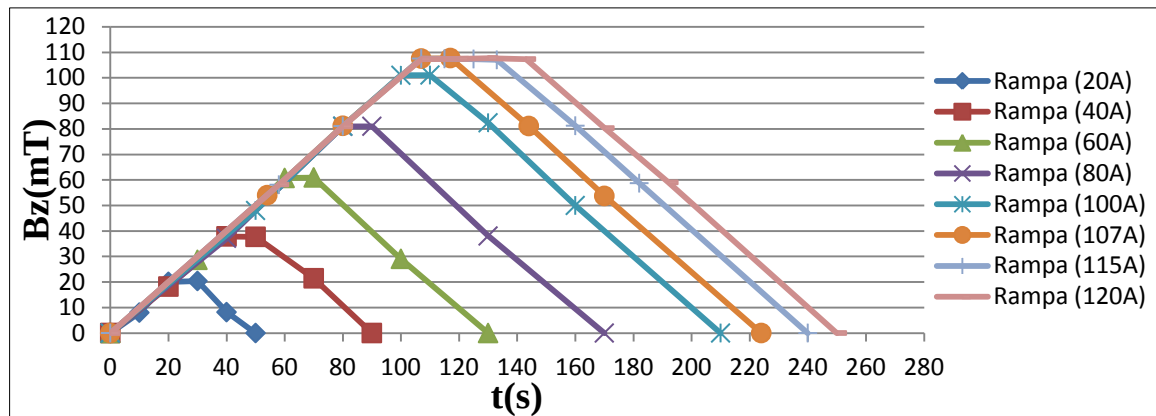


Figura 5.12: campo magnético central em função do tempo na bobina NI.

Observa-se pela figura 5.12 que os valores de campo magnético, quando a corrente atinge valores acima da corrente crítica ($I_c=107A$) 115 e 120A, são praticamente os mesmos e o campo magnético é saturado. Isso sugere que a corrente excedente é desviada de uma espira para outra, através do contato entre elas [47].

Nessa condição, a bobina sem isolamento se torna mais estável termicamente e aumenta a corrente de operação, em relação à bobina I.

Já a bobina NIC apresenta o comportamento apresentado na figura 5.13.

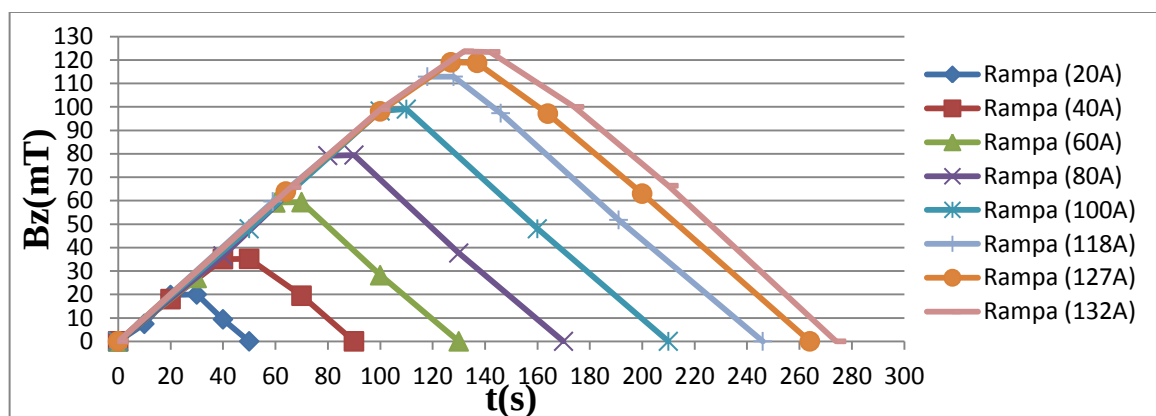


Figura 5.13: Campo magnético central em função do tempo na bobina NIC.

Na figura 5.13, quando a rampa de corrente é de 127 e 132 A, valores acima da corrente crítica ($I_c = 118 A$), o campo magnético sofre uma pequena queda, comparado à proporção dos aumentos dos valores anteriores, portanto na bobina NIC o campo não chegou à saturação como na bobina NI, porque a corrente não pôde ser aumentada para evitar danos à bobina.

Além da bobina I, a análise das bobinas NI e NIC também foi limitada pelo valor de tensão, visto que com corrente um pouco acima dos valores máximos dos patamares

apresentados nessas curvas, a tensão aumenta repentinamente. Nesse intuito, a análise de tensão nos terminais das bobinas para cada patamar é importante para avaliar a estabilidade térmica e evitar danos às mesmas.

A princípio, foi feita a análise de tensão na bobina I e o resultado é exibido na figura 5.14.

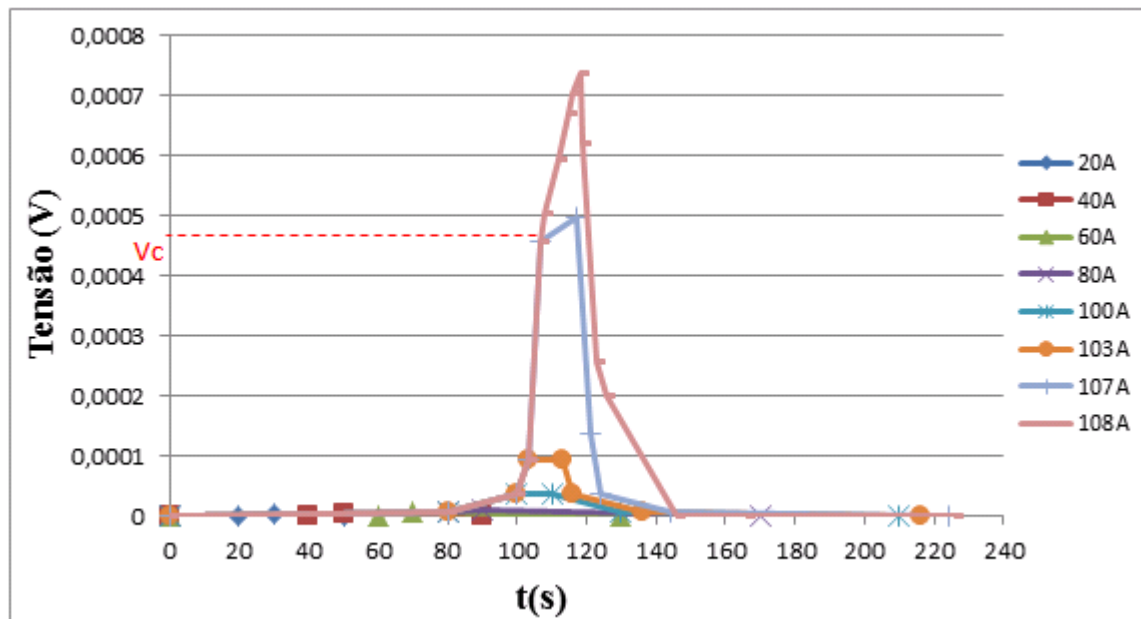


Figura 5.14: Tensão nos terminais da bobina I em função do tempo.

Na figura 5.14, quando a corrente é mantida no seu valor crítico de 107A por 10s, a tensão aumenta. Essa elevação está relacionada ao aquecimento dos fios supercondutores devido ao isolamento entre as espiras, uma vez que, com esse isolamento, a área de transferência de calor é mínima em razão da própria espessura reduzida dos fios. Durante os experimentos, para avaliar o comportamento um pouco acima de I_c , foi aplicada uma excitação um pouco acima (1A de acréscimo) da corrente crítica, aplicando 108 A à bobina. Observe como a taxa de aumento da tensão, no patamar de 10s, cresce quando aumenta de 107 para 108 A. Essa tendência de aumento da tensão é tão grande que não dá para injetar corrente com valores mais altos. Isso mostra a importância da elevação da tensão, pois a energia dissipada será o produto de V e I na bobina. Portanto, quanto maior V maior a potência dissipada e mais riscos de danificar a bobina por sobreaquecimento.

Em seguida, são apresentados, na Figura 5.15, os resultados da tensão medida nos terminais da bobina NI.

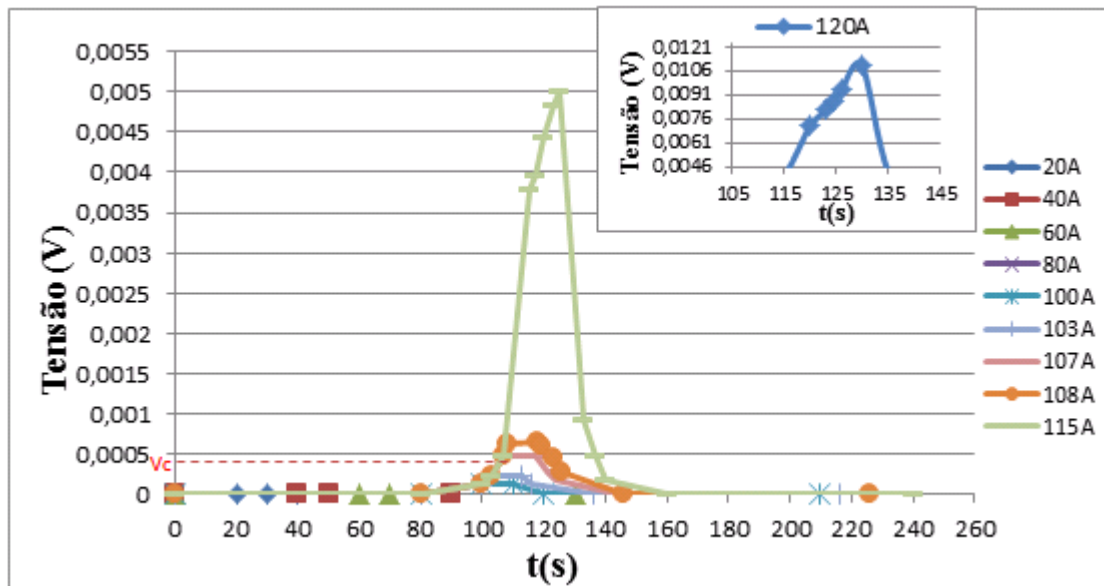


Figura 5.15: Tensão nos terminais da bobina NI em função do tempo. A janela é uma vista ampliada do patamar de 120A.

Na bobina NI, no momento em que a corrente crítica ($I_c=107A$) foi sustentada por 10s, a tensão crítica ($V_c = 0,00047V$) também foi mantida. Isso significa que na I_c ela fica estável, diferente do resultado da bobina I, figura 5.14, no qual a tensão aumenta já na I_c .

No patamar, 1A acima do valor crítico, a tensão fica praticamente constante durante os 10s, enquanto que na bobina I, a tensão aumenta significativamente.

Diferentemente da bobina I, na bobina NI a corrente pôde ser aumentada para valores ainda maiores, de 115 e 120A, contudo, nesses patamares a tensão também aumenta.

No patamar de 120A, figura 5.15, vista ampliada, a taxa de inclinação é alta, atingindo valores de tensão que se aumentada poderia danificar a bobina, portanto, foi o limite para a injeção de corrente nessa bobina.

Por fim, a investigação de tensão nos terminais da bobina NIC é apresentada na figura 5.16.

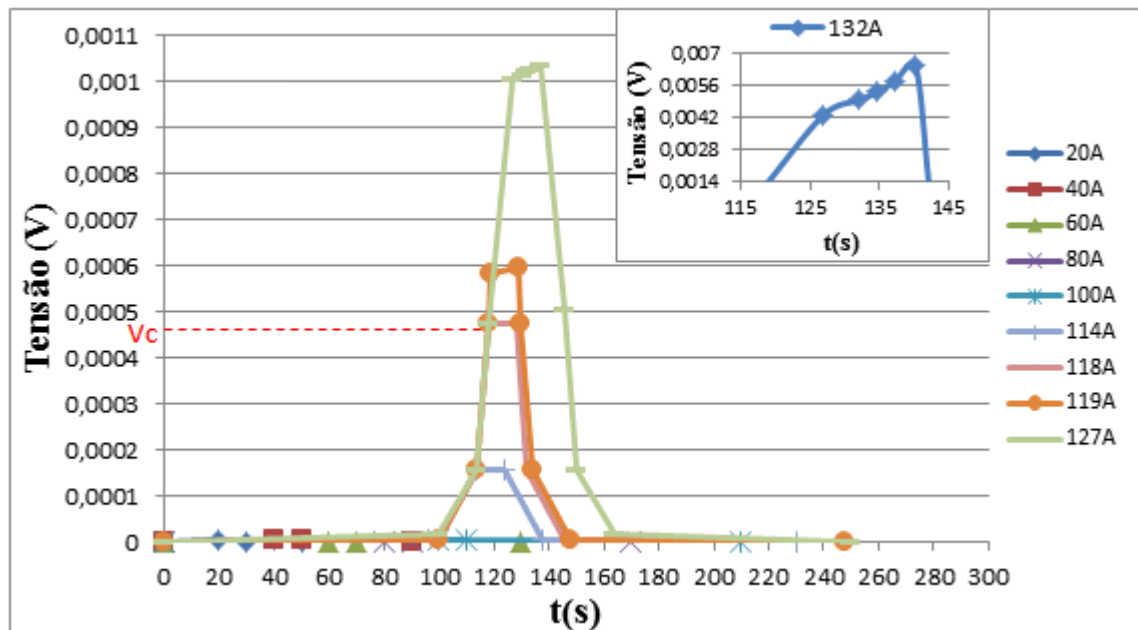


Figura 5.16: Tensão nos terminais da bobina NIC em função do tempo. A janela é uma vista ampliada do patamar de 132A.

Na figura 5.16, a corrente atingiu 132A que é proporcional a 120A na bobina NI em termos de I/I_c ($= 1,12$). Nessa corrente a tensão chegou a 0,0068V, valor menor que o detectado na bobina NI, 0,0116V. Este resultado indica que em corrente acima de I_c essa bobina exibe menor valor de tensão que a bobina NI. Desta forma, em termos de estabilidade térmica, a bobina NIC aparenta ser superior às demais.

A análise de carga e descarga realizada mostra que as bobinas sem isolamento apresentam algumas vantagens em relação às com isolamento em corrente contínua. No entanto, foi realizada a avaliação das perdas resistivas das bobinas em corrente alternada, de modo a verificar se nessa condição também as bobinas sem isolamento são vantajosas.

5.4. LEVANTAMENTO DAS PERDAS RESISTIVAS EM CORRENTE ALTERNADA DAS BOBINAS SUPERCONDUTORAS

No capítulo 2 foi citado que em corrente contínua os supercondutores não apresentam perdas, só apresentam pequenas perdas em corrente alternada. Portanto, aqui são avaliadas as perdas resistivas das bobinas supercondutoras I, NI e NIC em corrente alternada, de modo a contemplar essa citação e também avaliar o efeito das configurações de isolamento estudadas.

5.4.1. Realizações dos ensaios

O levantamento das perdas resistivas em corrente alternada foi realizado no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do CEPEL. Para o ensaio foi utilizado um osciloscópio digital de quatro canais, modelo DPO7104 Tektronix; um disjuntor geral de 200 A/480 V; um autotransformador de múltiplas relações; um Variac manual; uma chave estática de 500 A/600 V; um transformador trifásico de múltiplas relações 127/220/380/480/660/720/660-480 V; um transformador de corrente de múltiplas relações (TC) de 100 a 6000 A – 5 A, tipo janela autocompensado com quatro terminais; um amperímetro analógico de múltiplas escalas 5 mA a 10 A; um; cabos de cobre isolados em borracha flexíveis e um recipiente criogênico isolado a vácuo, que contém LN₂, no qual foi submergida a bobina sobre ensaio.

Com todos esses aparatos, foi adaptado o circuito, figura 5.17, já existente no laboratório para a realização destes experimentos.

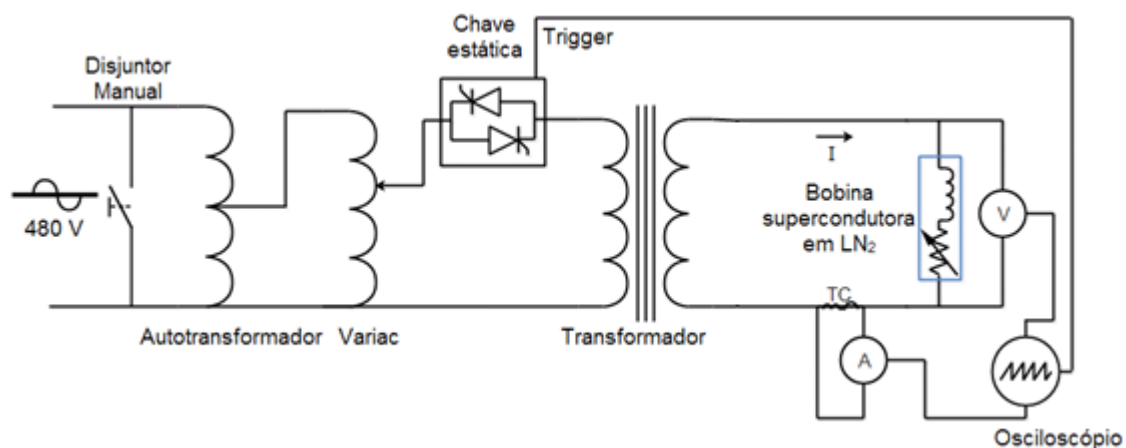


Figura 5.17: Circuito montado para o levantamento das perdas AC nas bobinas supercondutoras I, NI e NIC.

5.4.2. Procedimento de ensaio e Resultados obtidos

Com o circuito mostrado na figura 5.17, os ensaios foram realizados seguindo basicamente os seguintes procedimentos: primeiramente o disjuntor geral foi ligado manualmente na tensão da rede de 480 V e, através do autotransformador, do Variac e do transformador, a tensão foi variada de acordo com a corrente que se pretendia atingir nas bobinas supercondutoras. A chave estática efetua o trigger e em 68,6 ms o circuito é

desligado. Esse tempo de aproximadamente 4 ciclos foi definido com o intuito de evitar danos nas bobinas para correntes acima da I_c .

Para melhor confiabilidade dos resultados obtidos, de início foi ensaiado um shunt, de 600 A e 60 mV, e a resistência atingida foi de $101,8 \mu\Omega$, bem próximo do valor de $100 \mu\Omega$ especificado.

Assim, as medidas de tensão e corrente foram feitas utilizando um voltímetro e um amperímetro, respectivamente. Com o auxílio do osciloscópio foram representados graficamente esses sinais elétricos no domínio temporal e as diferentes características desses sinais foram medidas, como mostra a figura 5.18.

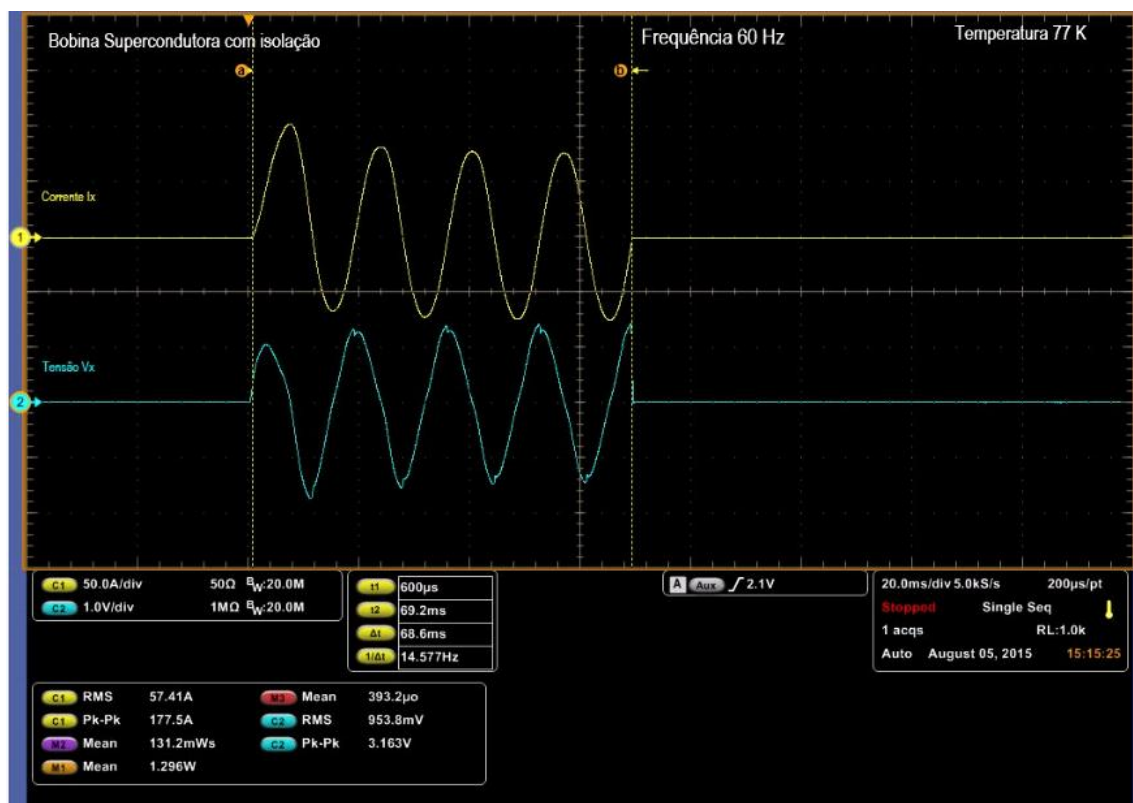


Figura 5.18: Tela do osciloscópio com os sinais elétricos de tensão e corrente da bobina supercondutora com isolamento, e suas respectivas características.

Na literatura [50], [66], [67], o circuito para o levantamento das perdas resistivas CA em bobinas supercondutoras conta com uma bobina de cancelamento (*cancel coil*), de modo a cancelar a parte indutiva. Com esse cancelamento a tensão fica em fase com a corrente (valores eficazes) e as perdas são determinadas pela extração de apenas a potência ativa a partir da potência aparente.

No presente trabalho, a potência dissipada foi calculada por meio de integração matemática a partir dos oscilogramas V e I , empregando-se um osciloscópio modelo DPO7104 Tektronix. Desse modo, em cada bobina foram calculados os valores eficazes de V e I e a defasagem entre a tensão e a corrente (ϕ). As perdas foram levantadas baseando-se em $P = VxI \cos(\phi)$. Sendo obtido P , é possível determinar a resistência equivalente pela lei de Joule, $P = R x I^2$.

O levantamento das perdas AC resistivas nas bobinas I, NI e NIC, figura 5.19, foram realizadas com a medição em cada nível de corrente, na frequência de 60 Hz, que foi aumentada até atingir um valor acima da I_c (em corrente contínua), pois, mesmo em corrente alternada, onde as perdas são maiores, o tempo de 68,6 ms é muito curto e as bobinas foram ensaiadas sem nenhum risco, o que se confirma pela caracterização CC após os ensaios em CA.

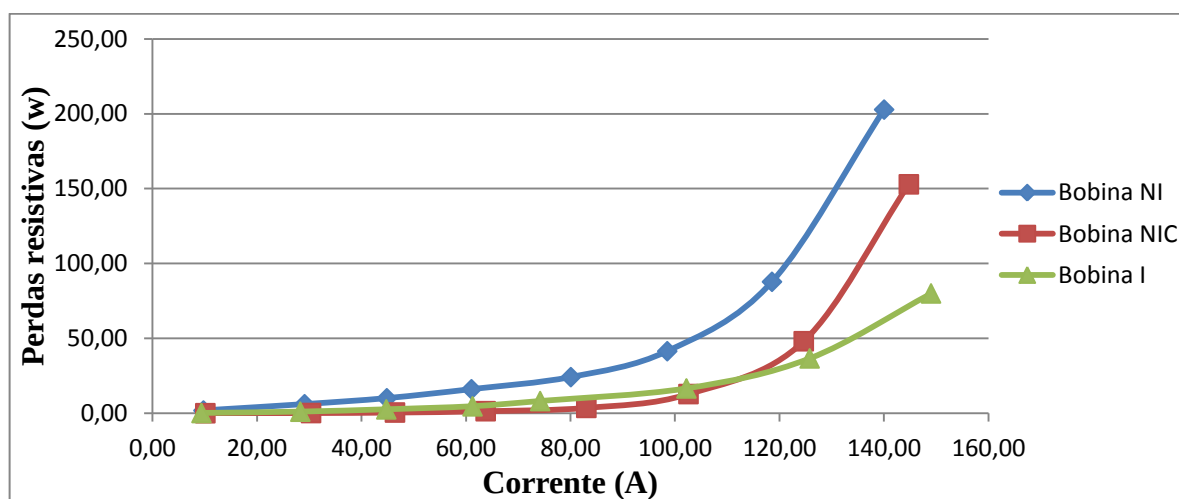


Figura 5.19: Levantamento das perdas resistivas das bobinas supercondutoras em AC.

Esse resultado mostra que a bobina NI apresenta maiores perdas resistivas em corrente alternada em comparação com as bobinas I e NIC. Nessa condição, diferente da condução em corrente contínua, o supercondutor apresenta pequenas perdas, com o material ainda em estado supercondutor, gerado pelas correntes de fuga.

O resultado do comportamento das perdas em AC da bobina NIC em relação às da bobina I não foi o esperado, uma vez que, essas estão relacionadas com a corrente de fuga entre as espiras e deveriam ser maiores na bobina NIC do que na I para qualquer corrente. Porém, em pequenas correntes, talvez pela proximidade dos valores e alguma discrepância no enrolamento, a bobina NIC apresentou menos perdas.

5.5. ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS

Aqui são feitas as respectivas discussões de todos os resultados obtidos nesse trabalho.

Pela comparação das curvas obtidas na figura 3.8, fica evidente a maior corrente crítica dos fios da SuNAM em relação aos fios da SuperPower e da SuperOx. Além disso, esses fios também apresentam um custo muito mais acessível. Esses dois fatores influenciaram diretamente na decisão de se utilizar esses fios nas bobinas.

Objetivando a aplicação dessas bobinas em aplicações práticas futuramente, como magneto, máquinas elétricas e limitadores CC, foi de extrema relevância analisar o efeito do campo magnético nos fios. Nesses casos essa análise é primordial, uma vez que nessas aplicações as bobinas são submetidas a auto-campo.

Nesse estudo foi avaliada a incidência de campo magnético paralelo e perpendicular à face dos fios e a comparação dos resultados permite relatar que o campo na direção perpendicular é que causa mais efeito nos fios, apresentando maior decaimento da corrente crítica e do índice n .

O fio da SuNAM apresenta maior valor de corrente crítica sem campo magnético externo e menor custo, entretanto, o decaimento com campo magnético é maior.

5.5.1. Caracterização e mapeamento das bobinas supercondutoras

Os resultados das caracterizações das bobinas supercondutoras mostraram que o próprio enrolamento em panqueca dupla que foi executado faz decair a corrente crítica. As duas panquecas geram um autocampo induzido, que se somam. A distribuição desse campo foi analisada através do mapeamento, que indica um maior valor no centro da bobina. Portanto, as espiras mais internas atingem antecipadamente a corrente crítica, o que limita a condução de corrente das bobinas. Todavia, em alguns casos as bobinas são construídas de modo a anular o autocampo e preservar a bobina desse efeito desfavorável. Mas, nem sempre queremos a construção de bobinas com o autocampo completamente extinto, isso depende da aplicação. Dessa forma, nesse trabalho as bobinas foram construídas intencionalmente com o autocampo induzido na mesma direção, justamente para observar o efeito do autocampo nas bobinas.

5.5.2. Carga e descarga das bobinas

Pelo resultado apresentado na figura 5.12, é evidente o comportamento de campo saturado da bobina NI para valores de corrente superior ao valor crítico. Comparando esse resultado com o da figura 2.15b de [4], é notável a divergência desses, pois naquele trabalho o campo não satura, apenas tem uma tendência à saturação. Possivelmente essa divergência está associada ao fio supercondutor utilizado. Sendo utilizado aqui o fio 2G HTS de ReBCO e no trabalho citado fio de Bi2223.

Em [5], o fio 2G HTS de ReBCO também foi usado no enrolamento da bobina sem isolamento e o comportamento do campo, como mostra a figura 2.21c, é similar ao da figura 5.12, isso mostra que, de fato, o modelo de fio utilizado nesse tipo de bobina pode influenciar o comportamento do campo magnético.

Já na bobina I, figura 5.11, esse comportamento é similar ao de todos os trabalhos citados no item 2.7.1.2. Porém, em [5], [54], a bobina foi danificada durante alguns ensaios onde a corrente crítica foi ultrapassada, sugerindo que uma proteção adicional é necessária para esta bobina em caso de *quench*.

Em relação à bobina NIC, até então, não foi constatado nenhum trabalho com a análise de carga e descarga como apresentado aqui, tornando esse estudo singular.

Essa bobina apresenta maior valor de campo que as outras duas bobinas, pois, como já citado, o fio de cobre funciona como uma âncora térmica, que ajuda a evitar sobreaquecimento, garantindo maior valor de corrente crítica.

Em todas as bobinas a excitação de corrente foi limitada pela tensão, pois para certos patamares superiores ao da corrente crítica, a tensão aumenta repentinamente, e a bobina poderia sofrer danos caso mais corrente fosse injetada.

Nesse sentido, tornou-se ainda mais relevante à observação da tensão nos terminais das bobinas com a corrente em rampa e essa verificação possibilitou avaliar a estabilidade térmica.

Na bobina I, durante 10s, no patamar da corrente crítica, a tensão aumenta quase que linearmente, figura 5.14. No resultado do trabalho [4], mostrado na figura 2.16b, a tensão só teve aumento quando a corrente atingiu um valor de aproximadamente 29 % acima do patamar crítico, sendo esse aumento não linear, com sobreaquecimento e recuperação

ocorrendo nos enrolamentos. Já em [5], o resultado de tensão na bobina com isolamento é análogo ao da figura 6, com o aumento de tensão quase que linear, mas para um patamar de corrente 9A maior que o patamar crítico.

Já na bobina NI, o comportamento da tensão encontrado aqui é distinto dos trabalhos citados. Nos estudos [4] [5] [54] a tensão é mantida estável para patamares bem acima da I_c , em torno de 61%, como figura 2.22b, enquanto que nesse trabalho a tensão aumenta significativamente com o patamar de corrente apenas 7% acima do patamar crítico, figura 5.15. Esse aumento de tensão pode ser vinculado ao aquecimento da espira solitária que liga as duas panquecas da bobina *double pancake*.

Na bobina NIC, considerando a proporcionalidade dos valores de corrente usados na análise, o comportamento da tensão nos patamares de corrente superior ao crítico é menos íngreme que na bobina NI.

Deste modo, comparando a tensão nos terminais das bobinas I, NI e NIC, mostrados nas figuras 5.14, 5.15 e 5.16, respectivamente, indicam que a bobina NIC é mais estável termicamente, visto que em corrente acima do seu valor crítico, o aumento de tensão é menor que a dos outros. Este aumento na estabilidade térmica pode ser atribuído a diversos fatores: um caminho paralelo para derivar mais facilmente a corrente que passaria pelo *hot spot*, maior capacidade térmica da bobina (que possui uma massa adicional de cobre nessa topologia), e melhor troca de calor entre as espiras.

5.5.3. Levantamento das Perdas Resistivas em corrente alternada

Os resultados obtidos aqui são aproximados aos encontrados nos diversos trabalhos da literatura [50], [66], [67], apesar de o método utilizado ser distinto. Pelas análises comparativas realizadas nesses estudos citados, as perdas CA são maiores na bobina sem isolamento que nas com isolamento, em 60 Hz. Isso também é verificado na figura 5.19.

Por conseguinte, os resultados alcançados com esse levantamento, evidenciam que todas as vantagens obtidas em corrente contínua das bobinas sem isolamento em relação às com isolamento podem ser extintas em CA, uma vez que nessa condição as bobinas sem isolamento apresentam maiores perdas resistivas. Contudo, apenas essa análise não assegura que em outros quesitos as bobinas sem isolamento possam também apresentar vantagens comparadas às com isolamento.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram avaliadas as características elétricas e magnéticas de bobinas supercondutoras, considerando diferentes configurações de isolamento. O objetivo foi analisar em corrente contínua se as bobinas supercondutoras sem isolamento são favoráveis quando comparadas às bobinas com isolamento, com o intuito de poder operar com maiores correntes e aumentar a estabilidade térmica.

Para alcançar o objetivo pretendido nesse trabalho, alguns protótipos de bobinas supercondutoras foram construídos com diferentes configurações de isolamento, uma com isolamento Kapton entre as espiras (I), outra sem isolamento (NI) e uma sem isolamento e com um fio de cobre em paralelo, entre as espiras de fios supercondutores (NIC), todos em formato de panqueca dupla.

Nesse modelo de bobina, a espira que liga as duas panquecas fica exposta e aquece, limitando a injeção de corrente, portanto não foi possível elevar a corrente para valores muito maiores que a corrente crítica. No entanto, o comportamento desejado pôde ser observado com a corrente em um patamar de 1A acima do patamar crítico na bobina I, e 13A nas bobinas NI e NIC.

Pelos resultados da análise de carga e descarga, foi possível concluir que em corrente contínua as bobinas sem isolamento são vantajosas em relação às bobinas com isolamento, pois, pelo comportamento de campo saturado da bobina NI, fica evidente que parte da corrente é desviada pelo contato entre as espiras, aumentando a corrente de operação.

Em termos de estabilidade térmica, a bobina NIC é a que se destaca, visto que o uso do fio de cobre entre as espiras facilita a dissipação de calor quando a corrente injetada é acima da corrente crítica. Uma vez que, nesses patamares de corrente, a temperatura aumenta repentinamente em determinados pontos, *hot spots*, e podem queimar a bobina. Comparando a bobina NI com a I, é possível pelos valores de tensão nos terminais das bobinas, realçar que a bobina NI é mais estável termicamente. Isso ocorre porque devido ao contato entre as espiras o calor excessivo gerado por pontos quentes pode ser mais facilmente dissipado.

Esses resultados em CC destacam a ideia de que os equipamentos que usarem bobinas NI podem ser compactos, mais estáveis e, por conseguinte com maior integridade mecânica.

Já em corrente alternada, como pode ser visto na figura 5.19, as perdas resistivas foram maiores na bobina NI, portanto há evidência de que essas melhorias citadas podem não ser encontradas nessa condição. Desta forma, para aplicações dessas bobinas em equipamentos elétricos CA são necessários novos estudos.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Os estudos expõem que as propriedades elétricas e magnéticas de bobinas supercondutoras, considerando as configurações de isolamento, têm sido desenvolvidas em todo o mundo com o intuito de apresentar as vantagens das bobinas sem isolamento comparado às bobinas com isolamento, em CC, de modo a usar as bobinas NI em detrimento das bobinas com isolamento, principalmente quando são submetidas a campo magnético. Entretanto, ainda existem muitos desafios a serem superados, como os que foram apresentados neste trabalho e, para isso, mais trabalhos precisam ser realizados e, com eles, estudos consistentes buscando superar essas instigações.

Um dos estudos que pode ser sugerido é uma investigação mais aprofundada dos parâmetros elétricos e magnéticos em bobinas supercondutoras sem isolamento e em corrente alternada.

Outro trabalho de interesse nesse âmbito seria uma análise detalhada de medidas de temperatura entre cada espira das bobinas I, NI e NIC, de modo a investigar com maior profundidade o que realmente acontece quando a corrente supera o seu valor crítico, e, em qual bobina a formação de *hot spot* é maior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. J. Do Carmo, F. Sass, A. C. Ferreira e R. d. A. Júnior, “Armazenadores de energia magnéticos supercondutores - smes: aplicações,” em CBA 2012, Leopoldina, 2012.
- [2] “HTS Materials Technology,” SuperPower, [Online]. Available: <http://www.superpower-inc.com/content/hts-materials-technology>. [Acesso em 5 Janeiro 2016].
- [3] H. Rogalla e P. H. Kes, 100 years of Superconductivity, Taylor & Francis Group, 2012.
- [4] S. Hahn, D. K. Park, J. Bascunan e Y. Iwasa, “HTS Pancake Coils without turn-to-turn insulation,” IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 21, n. 3, June 2011.
- [5] Y.-G. Kim, S. Hahn, K. L. Kim, O. J. Kwon e H. Lee, “Investigation of HTS Racetrack Coil Without Turn-to-Turn Insulation for Superconducting Rotating Machines,” IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 22, n. 3, June 2012.
- [6] Z. Y. Li, Y. Wang, J. Xu, D. Xu, Z. Hong, Z. Jin, K. Ryu, S. Yoon e K. Cheon, “Design and Test Performance of 2G Pancake Coils for HTS DC Induction Heater Prototype,” IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 25, n. 3, June 2015.
- [7] Superconductivity Present and Future Applications, Coalition for the commercial application of superconductors, CCAS, 2014.
- [8] V. D. Delft e P. Kes, “The discovery of superconductivity,” Physics Today, p. 36, 2008.
- [9] H. K. Onnes, “The superconductivity of mercury,” Commun Phys, p. 120b, 1911.
- [10] A. B. Pippard, “Early Superconductivity research (Except Leiden),” IEE Transactions on Magnetic, vol. 23, n. 2, 1987.
- [11] A. C. Rose-Innes e E. Rhoderick, Introduction to Superconductivity, Pergamon Press, 1994.
- [12] B. S. Marat, AC Losses in High Temperature Superconductors under-Sinusoidal Conditions, Israel, 2010.
- [13] w. H. Hayt e J. A. Buck, Eletromagnetismo, Mc Graw Hill, 2008.
- [14] J. Barden, L. Cooper e J. R. Schrieffer, “Theory of Superconductivity,” Physical Review, vol. 108, n. 5, pp. 1175-1204, 1957.
- [15] F. G. Martins, Projeto de um Motor Linear Supercondutor com Fios de Segunda Geração, Rio de Janeiro: Dissertação de M. Sc, COOPE/UFRJ, 2014.

- [16] A. C. Rose-Innes e E. Rhoderick, *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, 1978.
- [17] T. L. Schneider, *Processamento e Caracterização do Compósito Supercondutor YBa₂Cu₃O_{7-δ}/Au*, Ponta Grossa: Dissertação de Pós Graduação em Ciências, 2014.
- [18] F. London e H. London, "The Eletromagnetic Equations of the Superconductor," *Proceedings of the Royal Society*, vol. A149, pp. 71-78, 1935.
- [19] F. London, *Superfluids*, Dover, 1964.
- [20] G. G. Sotelo, *Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos*, Rio de Janeiro: Tese de Doutorado COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [21] F. Sass, *Mancais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fios de Segunda Geração*, Rio de Janeiro: Dissertação de M. Sc, COOPE/UFRJ, 2011.
- [22] A. A. Abrikosov, "On the Magnetic Proprieties of Superconductors of the Second Group," *Soviet SPhysics*, vol. 5, p. 1174, 1957.
- [23] T. A. Silva, *Construção, Ensaio e Modelarização de um Limitador de Corrente Supercondutor*, Lisboa: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [24] E. d. B. Silva, *Estudo de Materiais Supercondutores: Corrente Crítica de Amostras Granulares de YBa₂Cu₃O_{7-δ}*, Juazeiro, Bahia: Universidade Federal do Valo do São Francisco, 2014.
- [25] V. L. Ginzburg e L. L. D, *On the Theory of superconductivity*, JETP, 1950.
- [26] R. N. Linares, *Balance de un Siglo de Superconductividad y Superconductores*, Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 2009.
- [27] A. K. Saxena, *High-Temperature Superconductors*, 2 ed ed., Springer: Heidelberg Dordrecht London New York, 2012.
- [28] W. Sousa, *Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters*, Rio de Janeiro: COOPE/UFRJ, 2015.
- [29] K. Xu, P. Cao e J. R. Heath, *Achieving the Theoretical Depairing Current Limit in Superconducting Nanomesh Films*, American Chemical Society, 2010.
- [30] D. Larbalestier, Gurevich, F. D. M e A. Polyanskii, *High-Tc Superconducting Materials for electric power Application*, vol. 414, *Nature*, 2001.
- [31] J. Lamas, *Projeto e Construção de Limitador de Corrente de Curto Circuito Supercondutor Utilizando fitas de YBCO*, Lorena, São Paulo: Dissertação de M. Sc, 2009.
- [32] V. S. Da Cruz, *Investigação de Parâmetros de Projeto de Motores*, Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.

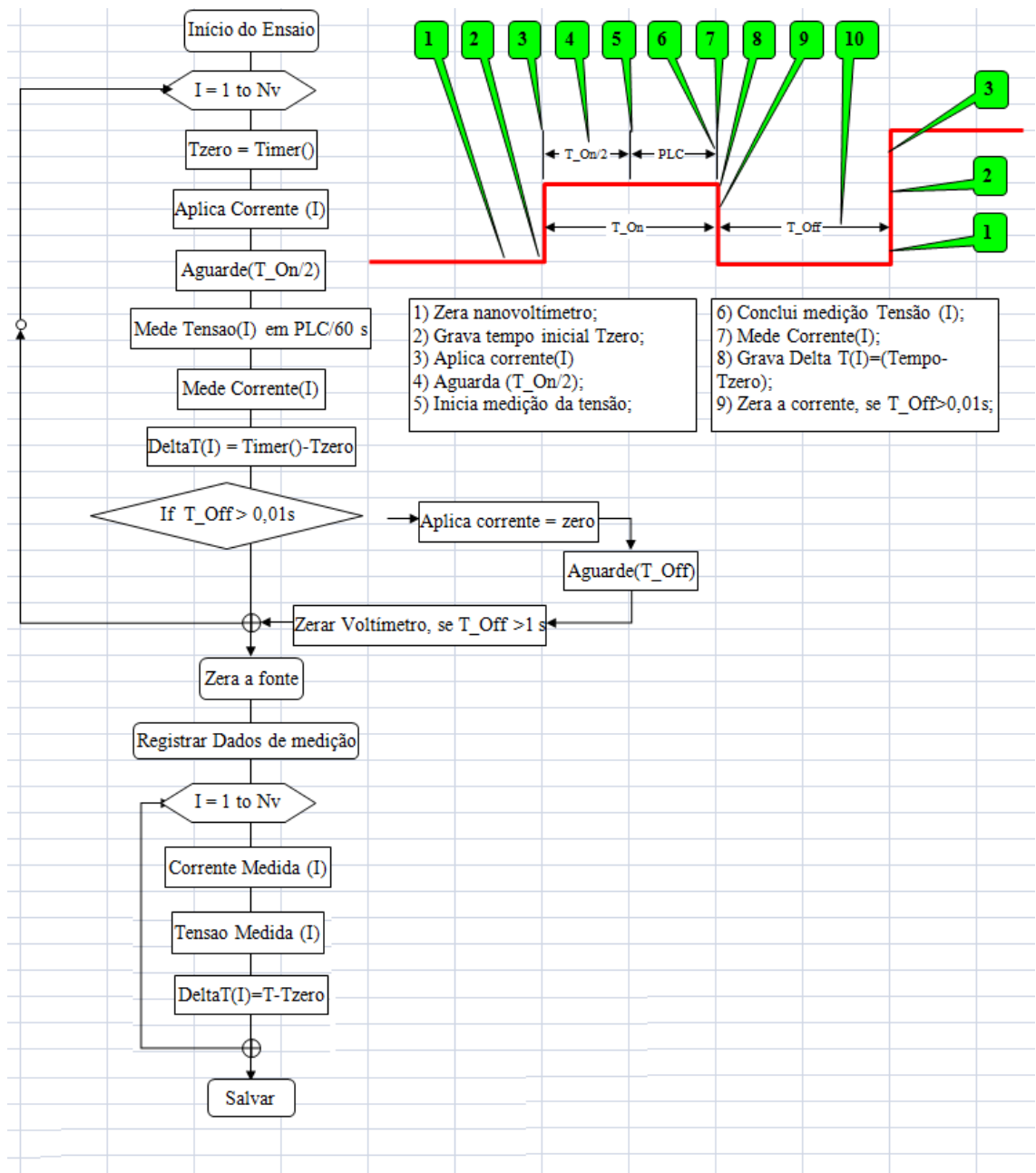
- [33] É. J. Souza, Fabricação e caracterização de fios supercondutores do Powder-In-Tube (PIT), Ilha Solteira, São Paulo, 2011.
- [34] A. D. Cardwell e S. D. Ginley, HandBook of Superconducting Materials, vol. 1, Superconductivity Materials and Process, 2.
- [35] K. Fosshein e A. Sudbo, Superconductivity - Phisicc and Application, West Sussex, 2004.
- [36] D. Shi, High-Temperature Superconducting Materials Science and Engineering: New Concepts and Technology, vol. 1, Pergamon, 1995.
- [37] C. Y. Shigue, T. T. Cruz, J. B. C. A. Lamas e E. R. Filho, "Analysis of the E-J Curve of the HTS Tapes Under DC and AC Magnetic Fields at 77K," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 19, n. 3, June 2009.
- [38] W. H. Warnes e D. C. Larbalestier, Critical Current Distributions in Superconducting Composites, vol. 26, Cryogenics, 1986.
- [39] A. Polasek, D. R. O. Filho, F. Sass, P. Barusco, F. Martins, A. Ferreira, F. Dias, D. Dias e G. Sotelo, Application of IEC 61788 for the determination of the DC critical current of high temperature superconductors of second generation, Cigré, 2014.
- [40] W. Paul, M. Chen e M. Lakner, "Fault Current Limiter Based on High Temperature Superconductors - Different Concepts, Test Results, Simulations, Applications," Phys. C Supercond., vol. 354, n. 14, p. 27–33, May 2001.
- [41] J. Duron, B. Dutoit e F. Grilli, "Computer Modeling of YBCO Fault Current Limiter Strips Lines in Over-Critical Regime With Temperature Dependent Parameters," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 17, n. 2, p. 1839–1842, June 2007.
- [42] T. Rettelbach e G. J. Schmitz, "3D Simulation of Temperature, Electric Field and Current Density Evolution in Superconducting Components," Supercond. Sci. Tecnology, vol. 16, n. 5, pp. 645-653, May 2003.
- [43] A. Moreira, E. L. R. Pinheiro, F. M. Abreu, L. H. d. Oliveira e S. C. Gonçalves, Materiais Supercondutores, 2000.
- [44] M. Watanabe, Ishiguri, R. Maruyama, M. Yamaguchi, S. Fukui, J. Ogawa e T. Sato, "A Study on High Temperature Superconducting Coil of Different Coil Arrangements," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 17, pp. 10-1109, 2007.
- [45] K. H, C. Lee, S. E. Yang, T. K. Ko e S. Bok-Y, "Dielectric Tests of Superconducting Coils for Development of High Voltage Superconducting Machines," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 17, pp. 10-1109, 2007.
- [46] Figueira e P. R. S., Projecto de um transformador de potência supercondutor, Lisboa:

Universidade Nova de Lisboa, 2013.

- [47] B. W. McConnell, S. P. Metha e M. S. Walker, "HTS Transformers," IEEE Power Engineering Review, vol. 20, n. 6, pp. 7-11, June 2000.
- [48] D. W. Hazelton, V. Selvamanickam, J. M. Duval, D. C. Larbalestier, W. D. Markiewicz, H. Weijers e R. L. Holtz, "Recent Developments in 2G HTS Coil Technology," IEEE, vol. 19, n. 3, June 2009.
- [49] C. P. Steinmetz e B. G. Lamme, "Temperature and Electrical Insulation," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. XXXII, n. 1, February 1913.
- [50] M. Zhang, W. Wang, Z. Huang, M. Baghdadi, W. Yuan, J. Kvitkovic, S. Pamidi e T. A. Coombs, "AC Loss Measurements for 2G HTS Racetrack Coils with Heat-Shrink Insulation," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, n. 5, pp. 645-653, May 2014.
- [51] T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, U. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi e H. Maeda, "Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation," Phys. C, vol. 470, n. 17/18, p. 67, 2010.
- [52] Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi e H. Maeda, "Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance," Phys. C, vol. 471, n. 15/16, p. 480-485, August 2011.
- [53] "SuperPower® 2G HTS Wire Specifications," SuperPower, [Online]. Available: http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_2G+Wire+Spec+Sheet_for+web_2012FEC_v2_1.pdf. [Acesso em 06 Novembro 2015].
- [54] H.-J. Shin, K. L. Kim, Y. H. Choi, D. Yang, Y.-G. Kim e L. Haigun, "A Study on Normal Zone Propagation Behavior of Partially Insulated GdBCO Coil," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 25, n. 3, June 2015.
- [55] J.-B. Song, S. Hahn, Y. Kim, J. Voccio, J. Ling, J. Bascunan, H. Lee e Y. Iwasa, "HTS Wind Power Generator: Electromagnetic Force Between No-Insulation and Insulation Coils Under Time-Varying Conditions," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 24, n. 3, June 2014.
- [56] D. G. Yang, S. Hahn, Y. Kim, K. L. Kim, J.-B. Song, J. Bascunan, H. Lee e Y. Iwasa, "Characteristic Resistance of No-Insulation and Partial-Insulation Coils With Nonuniform Current Distribution," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 24, n. 3, June 2014.
- [57] "Soldering Instruction," SuperPower, [Online]. Available: http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_Soldering+Instructions_2012FEC_v1.pdf. [Acesso em 6 Novembro 2015].
- [58] D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, F. J. M. Dias, L. M. M. Rocha, F. G. R. Matins, F. Sass e A. Polasek, "Characterization of a Second Generation HTS Coil for Electrical Power Devices," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 25, n. 3, June 2015.

- [59] "2G HTS WIRE," SuperPower, [Online]. Available: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>. [Acesso em 6 Novembro 2015].
- [60] S. Lee, V. Petrykin, S. Samoilenkov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky e S. Fetisov, "Development and Production of Second Generation High-Tc Superconducting Tapes in SuperOx and First Tests of Model Devices," SuperOx, 15 9 2013. [Online]. Available: http://dubna-oez.ru/images/data/gallery/172_7829_.V._Super_Oks.pdf. [Acesso em 6 Novembro 2015].
- [61] "Superconducting Wire," SuNAM, [Online]. Available: http://www.i-sunam.com/home/en_product,1,3,1,1,1. [Acesso em 6 Novembro 2015].
- [62] D. Turrioni, E. Barzi, M. J. Lamm, R. Yamada, A. V. Zlobin e A. Kikuchi, "Study of HTS Wires at High Magnetic Fields," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 19, n. 3, June 2009.
- [63] P. P. M. Junior, Comparação entre Protótipo de Transformador Supercondutor e Convencional em Pequena Escala, Niterói, Rio de Janeiro: TEE/UFF, 2015.
- [64] C. L. C. Júnior, Cobre e suas Ligas.
- [65] R. P. Fernandes, Desenvolvimento de um Sistema de Mapeamento de Densidade de Fluxo Magnético, Rio de Janeiro: DEE/UFRJ, 2011.
- [66] J. H. Young, C. Sukjin, C. J. Hyun, H. C. Yoon, J. K. Tae, H. Seungyoung e T. K. Ko, "Evaluations on AC Electrical Characteristics of No-Insulation Coil for Power Devices," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, n. 3, 2013.
- [67] D. N. Nguyen, C. H. Kim, J. H. Kim, S. Pamidi e S. P. Ashworth, "Electrical measurements of AC losses in AC losses in High Temperature Superconducting Coils at Variables Temperatures," Superconductor Science and Technology, vol. 6, p. 26.

Anexo A



ANEXO B

```

% Inicialização da Fonte

PS = visa('agilent','GPIB0::5::INSTR')
fopen(PS)
PS
set(PS,'EOSMode','read&write')
set(PS,'EOSCharCode','LF')
fprintf(PS,'*CLS; *RST');
fprintf(PS,'OUTP OFF')

% inicialização do nanovoltímetro

NV = visa('agilent', 'GPIB0::7::INSTR');
fopen(NV)
NV
set(NV,'EOSMode','read&write')
set(NV,'EOSCharCode','LF')
fprintf(NV,'*CLS; *RST');
idn = query(NV,'*IDN?');
disp(['IDN? = ' idn(1:end-1)])

%Parâmetros

clc;
St=0.5; %Passo do degrau
TON=0.5; %tempo de cada degrau de subida
TWAIT=10; %Tempo de aplicação da rampa
x=0; %Valor de comparação

%Definição do valor de pulso
M=60

% Ligação da fonte. Esta ligação inicial permitirá que as fontes
sejam
% ligadas sem chaveamento, dando somente um pico inicial. No
% decorrer do código, a fonte será levada ao valor nulo, e partirá
% para um novo valor de corrente a cada iteração, sem a ocorrência
% de novos picos de corrente
fprintf(PS,'VOLT 5; CURR %i',0)
fprintf(PS,'OUTP ON')

% Este trecho implementa um laço, que pega o valor de tempo
% referido (toc) ao definido como zero no início do programa (tic).
%O tempo do laço será o tempo somado ao valor de "d", levando em
%consideração a resolução de tempo da execução de cada linha de
%código
tic;
d=toc;
e=t
oc;
while (e<d+2)
    e=toc;
end

%Laço de subida

```

```

while (x<M)

    x=x+St; %Implementação de X
    fprintf(PS, 'VOLT 1; CURR %i',x)

    %Tempo de espera para que a fonte estabilize nos seus valores de
    %ressolução
    d=toc;
    e=toc;
    while (e<d+TON)
        e=toc;
    end

end

% Tempo de espera
d=toc;
e=toc;
N1=query(NV, 'MEAS:VOLT?');
While (e<d+TWAIT)
    e=toc;
end
N2=query(NV, 'MEAS:VOLT?');

%Laço de descida

While (x>0)

    x=x-St; % Decréscimo de x, em função do passo

    fprintf(PS, 'VOLT 1; CURR %i',x)

    %Tempo de espera para que a fonte estabilize nos seus valores de
    %ressolução
    d=toc;
    e=toc;
    while (e<d+TON)
        e=toc;
    end

end

fprintf(PS, 'OUTP OFF')

```